

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra výrobních strojů a konstruování

Vibrodiagnostika papírenských strojů

Vibrodiagnostics of Paper-Producing Machines

Student:

Bc. Stanislav Šimon

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jan Blata, Ph.D.

Ostrava 2016

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra výrobních strojů a konstruování

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Stanislav Šimon**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 3909T001 Konstrukční a procesní inženýrství

Specializace: 72 Technická diagnostika, opravy a udržování

Téma: **Vibrodiagnostika papírenských strojů**
Vibrodiagnostics of Paper-Producing Machines

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Technická diagnostika pomaluběžných strojních zařízení je obecně velmi problematická. Vzhledem k nízkým otáčkám je signál pocházející z poškození velmi nízký. Zabývejte se proto možnostmi identifikace poruch strojních zařízení s nízkými otáčkami, zvláště pak papírenských strojů. Zvolte vhodné metody pro vibrodiagnostické měření, navrhněte vhodná měřicí místa, proveďte potřebné měření, získaná data analyzujte a proveďte patřičná vyhodnocení a doporučení.

V rámci zadání zpracujte:

1. Rešerši a analýzu dané problematiky.
2. Ideově technický návrh řešení dané problematiky.
3. Zpracujte aplikaci na daný objekt.
4. Proveďte potřebná měření.
5. Proveďte konkrétní provozní vyhodnocení.

Podrobnější specifikaci zadání nebo jeho úpravy provede vedoucí práce.

Seznam doporučené odborné literatury:

JENČÍK, J. – VOLF, J. A KOL.: *Technická měření*. ČVUT v Praze 2003, 212 s., ISBN 80-01-02138-6

HELEBRANT, F. – ZIEGLER, J.: *Technická diagnostika a spolehlivost II – Vibrodiagnostika*. VŠB – TU Ostrava, Ostrava 2004, 1. vydání, 178 s., ISBN 80 – 248 – 0650 – 9.

TŮMA, J.: *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Sdělovací technika Praha 1997, 174 s., ISBN 80-901936-1-7.

KREIDL, M., ŠMÍD, R.: *Technická diagnostika*. BEN – technická literatura, Praha 2006, 1.vydání, 408s., ISBN 80-7300-157-6

HELEBRANT, F., ZIEGLER, J., MARASOVÁ, D. *Technická diagnostika a spolehlivost I - Tribodiagnostika*. 1. vydání, Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2001, 158 s. ISBN 80-7078-883-6

ŠAFR, E. *Tribotechnika*. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1984. 300 s. 04-243-84

ŠAFR, E. *Technika mazání*. 2. dopl. vydání, SNTL Praha - Nakladatelství technické literatury, Praha, 1970. 381 s. ISBN 04-010-70

KREIDL, M. a kol.: *Diagnostické systémy*. ČVUT v Praze, Praha 2001, 352 s., ISBN 80-01-02349-4

Podkladové materiály firem - ADASH s.r.o., Brüel Kjaer, SKF Ložiska a.s.

ČSN 01 6910 *Úprava písemností psaných strojem nebo zpracovaných textovými editory*. Praha: Český normalizační institut, srpen 1997. 36 s.

ČSN ISO 690 *Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura*. Praha: Český normalizační institut, 1999. 32 s.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Blata, Ph.D.**

Datum zadání: 11.12.2015

Datum odevzdání: 16.05.2016

doc. Dr. Ing. Ladislav Kovář
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 12. 05. 2016



Bc. Stanislav Šimon

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 12. 05. 2016



podpis

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Stanislav Šimon

Adresa trvalého pobytu autora práce: Jablunkov 506, 739 91

Poděkování

Děkuji panu Ing. Janu Blatovi, Ph.D. za odborné vedení. Dále bych rád poděkoval firmě Dif spol. s r. o. za poskytnuté materiály a spolupráci. Mé poděkování také patří paní Ing. Dagmar Kölblové za pomoc při vypracování. V neposlední řadě také děkuji rodině a slečně Ing. Zuzaně Konvičkové za podporu.

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Šimon, S. *Vibrodiagnostika papírenských strojů*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra výrobních strojů a konstruování, 2016, 61 s. Vedoucí práce: Ing. Jan Blata, Ph.D.

Tato diplomová práce se zabývá vhodnými metodami k zjišťování stavu papírenských strojů pomocí vibrodiagnostických měření a určení alarmových mezí pro různé výrobní rychlosti. V úvodu jsou charakterizovány jednotlivé části papírenského stroje. Dále jsou popsány výsledky z vibrodiagnostických měření na poškozených ložiscích pomaloběžných a rychloběžných papírenských strojů, u kterých byla závada detekována v počáteční fázi a dále sledována až do výměny ložiska. Následně jsou uvedeny metody k získávání alarmových hodnot a poté vypočteny pomocí statistických metod úrovně alarmů u pomaloběžných a rychloběžných papírenských strojů. Alarmy jsou vypočteny pro různé skupiny rychlostí a také zvlášť pro stranu pohonu a obsluhy. Nakonec jsou oba tyto papírenské stroje porovnány.

ANOTATION OF MASTER THESIS

Šimon, S. *Vibrodiagnostics of Paper-Producing Machines*. Ostrava: VŠB – Technical university of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Production Machines and Design, 2016, 61 p. Thesis head: Ing. Jan Blata, Ph.D.

The task of this thesis is to find suitable methods for identification of paper machines using vibration diagnostics tests to determine alarm limits for different production speeds. The introduction describes individual parts of the paper machine. Following part describes obtained results from vibration diagnostics on damaged bearings found in low-speed and high-speed paper machines. Defects were detected and monitored in the initial phase and followed up until – bearings replacement. Thesis also deals with methods for obtaining alarm values. Then alarm levels for low-speed and high-speed paper machines were calculated using statistical methods. Alarms were calculated for different groups of speed and separately for the drive and the operator side, too. According to obtained data and knowledge, these two paper machines are compared.

OBSAH

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE	- 7 -
Seznam použitých značek, zkratek a symbolů.....	- 9 -
1. Úvod do problematiky papírenských strojů	- 10 -
1.1 Sítová sekce.....	- 11 -
1.2 Lisová sekce	- 12 -
1.3 Sušicí sekce	- 14 -
2. Vibrodiagnostika nízkootáčkových ložisek	- 16 -
2.1 Obálka zrychlení	- 16 -
2.2 Analýza s využitím časového záznamu.....	- 18 -
3. Poškozená ložiska u papírenských strojů a jejich detekce	- 20 -
3.1 Poškozená ložiska u pomaloběžných papírenských strojů.....	- 20 -
3.1.1 Poškozené ložisko prvního horního lisu	- 22 -
3.2 Poškozená ložiska u rychloběžných papírenských strojů	- 28 -
4. Vibrodiagnostická měření v závodu Smurfit Kappa Žimrovice s.r.o.....	- 36 -
4.1 Technické údaje papírenského stroje v Smurfit Kappa Žimrovice s.r.o.	- 38 -
5. Nastavování alarmových hodnot.....	- 39 -
5.1 Obecné nastavení alarmů pro měření obálky signálu zrychlení.....	- 39 -
5.1.1 Přepoččet alarmů pro jiné hodnoty maximální frekvence	- 41 -
5.2 Nastavení alarmových hodnot s využitím statistických metod	- 42 -
6. Určení alarmových hodnot v závodu Smurfit Kappa Žimrovice s.r.o.	- 43 -
6.1 Určení celkových alarmových hodnot	- 46 -
6.2 Závislost hladiny vibrací na rychlosti stroje	- 47 -
6.3 Určení alarmových hodnot podle rychlosti stroje	- 49 -
7. Rozdílnosti pomaloběžných a rychloběžných papírenských strojů	- 51 -
7.1 Vyhodnocení dat z rychloběžných papírenských strojů.....	- 51 -
7.2 Porovnání pomaloběžných a rychloběžných papírenských strojů	- 54 -
7.2.1 Porovnání obálek zrychlení	- 56 -
8. Závěr	- 58 -
Použitá literatura	- 60 -

Seznam použitých značek, zkratek a symbolů

A	Alarm pro měřenou obálku zrychlení	[-]
A ₁	1. Alarm – výstraha	[-]
A ₂	2. Alarm – nebezpečí	[-]
ACC	(Acceleration) Zrychlení	[Gs]
BIAS	Systematická chyba vlastní měřicí techniky	[-]
BPMI	(Ball Pass Frequency of Inner ring) Frekvence vnitřního kroužku ložiska	[Hz]
BPFO	(Ball Pass Frequency of Outer ring) Frekvence vnějšího kroužku ložiska	[Hz]
EN2	(Envelope Filter 2) Obálka zrychlení s filtrem 2	[gE]
EN3	(Envelope Filter 3) Obálka zrychlení s filtrem 3	[gE]
ENV	(Envelope) Obálka zrychlení	[gE]
HFP	(High Frequency Peak) Vysokofrekvenční detekce	[gHFP]
HFR	(High Frequency Density RMS) Vysokofrekvenční špička	[gHFP]
M	moment, kterým je napínáno síto	$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$
RMS	(Root Mean Square) Efektivní hodnota	[-]
S	Směrodatná odchylka výběru	[-]
SKF	Svenska Kullagerfabriken	[-]
SV	Sušící válec	[-]
VEL	(Velocity) Rychlost	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
X _{ave}	Střední hodnota	[-]
X _i	Hodnota každého individuálního vzorku	[-]
a.s.	Absolutní sušina	[-]
d	Průměr vývrtu ložiska	[m]
f _{max}	Maximální frekvence	[Hz]
n	Počet vzorků	[-]
n _p	Provozní otáčky	$[\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}]$

1. Úvod do problematiky papírenských strojů

Moderní papírové stroje často dosahují rozměrů větších než 100 m na délku a až 12 m na šířku. Působivá je také výrobní rychlost, která může nabývat hodnoty až 120 km/h. Při výrobě je potřeba použít na 1 kg papíru přibližně 100 litrů vody. Je tedy nutné dbát na recyklaci vody, která se pohybuje u sofistikovaných zařízení okolo 90 %.

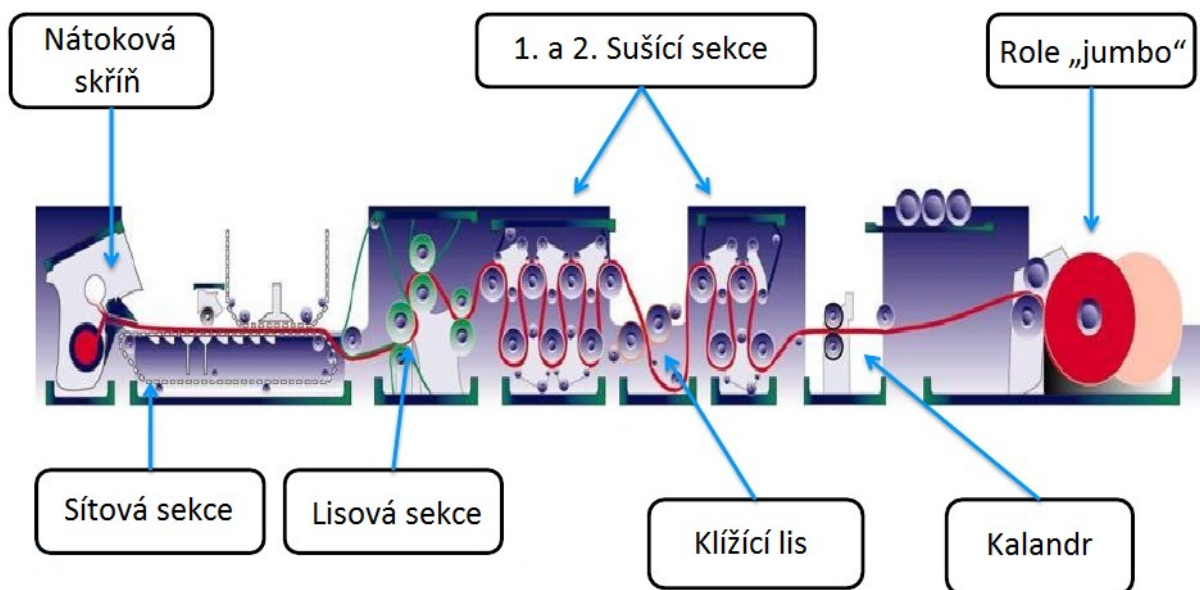
Hlavní funkcí papírenského stroje je vyrobit rovnoměrný pás papíru o požadované kvalitě. Toto složité soustrojí lze charakterizovat do tří základních skupin, a to na:

- Sítovou sekci – zde je formována prvotní vrstva papíroviny.
- Lisovou sekci – vzniklý pás papíroviny je zde lisován a zbavován tak vody.
- Sušicí sekci – zde se suší již vylisovaný pás papíru.

V počátečním úseku papírenského stroje je natékající papírovina neustále promíchávána. Následně se papírovina dostává na kontinuální formové síto, na kterém dochází k základnímu formování papírového pásu při značné rychlosti. V momentu, kdy papírovina opouští vstupní část stroje, obsahuje 99 % vody a pouze 1 % vlákniny. Při pohybu papírového pásu po kontinuálním formovém sítu dochází k rychlému odvodnění. Díky tomu se začínají vázat vlákna buničiny a zformuje se tak nosná papírová podložka. Ta je sevřena mezi spodní a horní pás formového síta a důsledkem toho dochází k odtoku přebytečné vody. V okamžiku přechodu ze sekce formovací do sekce lisovací obsahuje papírový pás přibližně 80 % vody. V lisovací části je stlačen sérií lisovacích válců, jejichž působením se sníží obsah vody zhruba na 50 %. Následuje sušicí a dosušovací část, kde dochází k jeho oboustrannému vysušování pomocí párou vyhřívaných sušících válců. V závislosti na požadovaných vlastnostech takto vzniklého papíru pak následně probíhá další zpracování a úpravy, jako například klížení a kalandrování. Ve finále je pak papír navíjen na velké role zvané jumbo.

Je potřeba si uvědomit, že všechny uvedené operace se uskutečňují ve vysoké rychlosti, tudíž provoz papírenského stroje vyžaduje vysokou přesnost a sladění celého soustrojí, aby nedocházelo k přetrhávání vznikajícího pásu papíru a tím neplánovaným zastavováním stroje. Pro předcházení těchto problémů a zjištění poruch už v počáteční fázi slouží účinný nástroj – vibrodiagnostika.

Na zjednodušeném schématu (Obr. 1.1) jsou zobrazeny jednotlivé sekce papírenského stroje. Je zde patrné přibližné umístění válců a průběh pásu papíru jednotlivými sekcemi (červená barva).



Obr. 1.1: Grafické znázornění struktury papírenského stroje [8]

Pro tuto kapitolu byly informace čerpány dle literatury [6], [7]

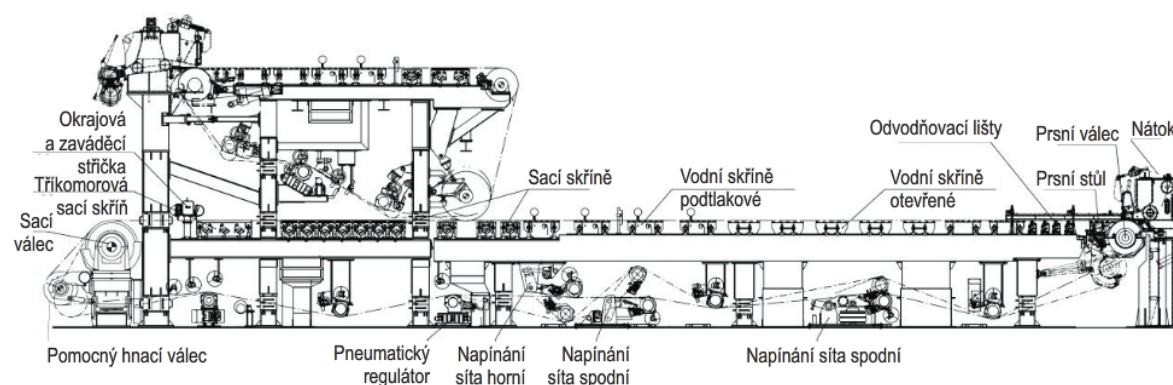
1.1 Sítová sekce

Pro tuto kapitolu byly informace čerpány dle literatury [1], [9].

Hlavní podstatou sítové části papírenského stroje je odvodnit látku (papírovinu) a proměnit ji v papírový list. Síto je ve své podstatě nekonečné a odvodnění zde probíhá tak, že se při vytékání látky na povrchu síta postupně usazují vlákna. Síto obepíná z jedné strany u nátoky prsní válec a na opačné straně válec sací, zvaný též gaučový, a válec hnací. Kombinace sacího a hnacího válce je doporučena jednak kvůli lepšímu rozložení hnací síly a šetrnějšího dopadu na vlastní síto, ale i z hlediska sejmutí papírového pásu a jeho převedení do následující lisové části.

Ve vrchní sekci mezi těmito válci jsou umístěny odvodňovací prvky, na kterých jsou zachyceny stírací lišty z umělé hmoty nebo keramiky, po nichž se pohybuje podélné

nekonečné síto a dochází tak k odvodnění látky. Velmi záleží na vhodném rozložení těchto prvků kvůli dosažení požadovaného podílu sušiny za síťovou částí. Je možné použít i parní skříně pro zvýšení teploty papíru před vstupem do lisovací části.



Obr. 1.2: Schéma síťové sekce papírenského stroje [9]

Obecně platí, že délka síťu bývá 12 až 54 m, ale závisí především na výkonu a druzích papírů vyráběných na stroji. Stroje pro střední rychlosti bez pick-up mají obvykle délku síťu 25 až 30 m, nejrychlejší stroje s pick-up délku síťu 36 až 54 m a samosnímací stroje dosahují délky síťu 12 až 18 m. V prvním případě je délka síťového stolu v rozmezí 11,5 až 13,5 m, v druhém 16 až 23 m a ve třetím 5,5 až 8 m. Obvykle je délka síťu a délka síťového stolu v poměru 2,15 až 2,35.

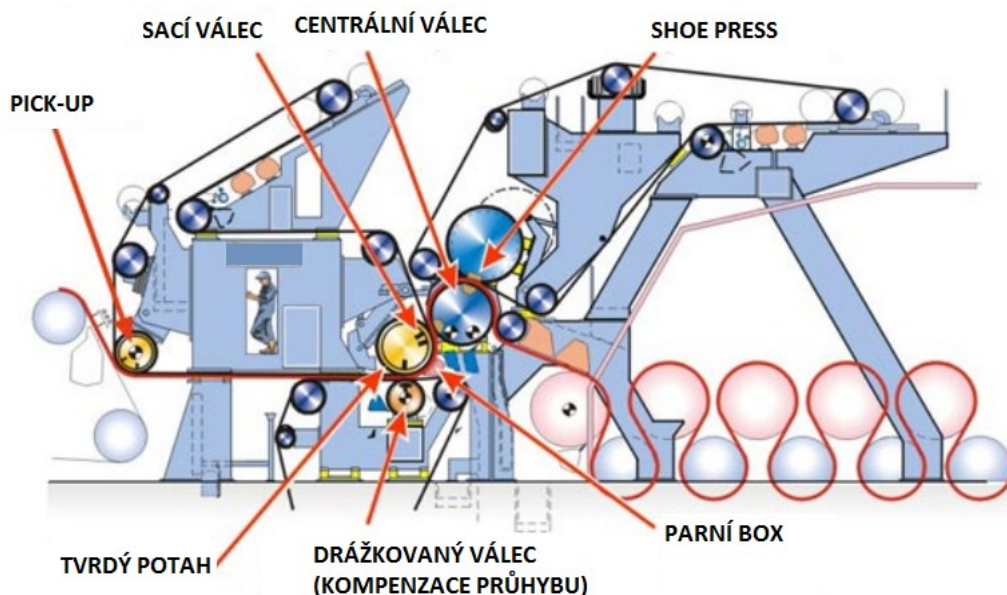
Ve spodní části síťového stolu je nekonečné síto neseno, vedeno a napínáno sérií válců. Je zde usazen regulátor běhu síťu, jenž usměrňuje síto z důvodu zamezení vyjetí síťu z osy stroje. Pro napínání síťu jsou používány ruční, nebo automatické napínáky síťu, které napnou síto na moment $M = 2,5$ až 8 N/mm . Při vratném chodu je pak síto očištěno vodními stříčkami, které odstraní vlákna, jež se při odvodnění na sítu zachytila.

1.2 Lisová sekce

Pro tuto kapitolu byly informace čerpány dle literatury [1], [9], [10]

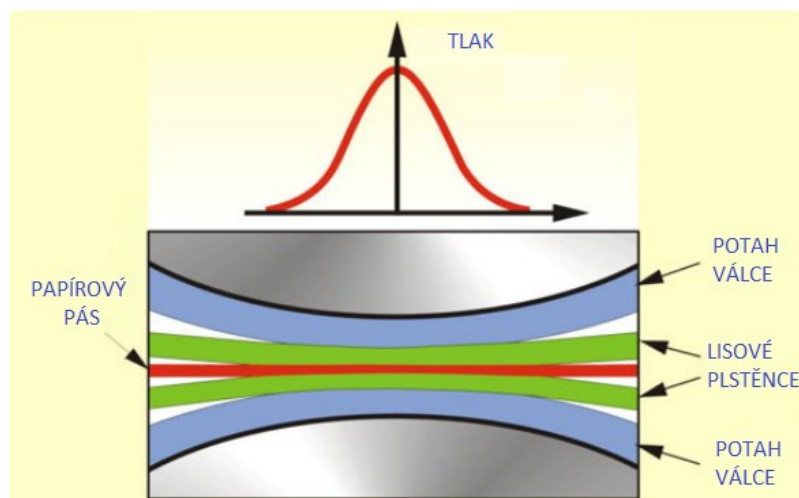
Po zformování v síťové sekci a částečném odvodnění se papírový pás oddělí od síťu a prochází lisovací sekci. Tato sekce je v procesu poslední, která mechanicky odstraní vodu v papírenském stroji. K tomuto záměru se využívá celá řada lisů, ať už s jednou nebo s více lisovacími zónami. U lisovací sekce bývá pracovní rychlost do $1\,000 \text{ m/min}$, pracovní šířka

do 6 000 mm a tah plstěnce do 5 kN/m. Při zvětšení suchosti pouze o 1% se sníží spotřeba páry o 4 až 5 %. Lisová sekce je tedy z jednou z neekonomičtějších cest, jak odvodnit papírový pás. Zpravidla jsou instalovány 2 nebo 3 lisy. U samosnímacích strojů je instalován jeden lis, při výrobě vysoce jakostních papírů bývají tyto lisy 4 a u výroby nepromastitelných papírů může být lisů až 5.



Obr. 1.3: Popis hlavních částí lisové části typu SymPress B [10]

Lisování může probíhat buď mezi plstěncem a hladkým válcem, anebo mezi dvěma plstěnci (Obr. 1.4). Vznikající tlak a zmenšování objemu způsobuje, že voda je v této části vylučována stlačením mezi válci, a je zčásti absorbována plstí nebo tkaninou a částečně pohlcena dutinami v povrchu válce. Lisová část také celkově ovlivňuje vlastnosti papíru.



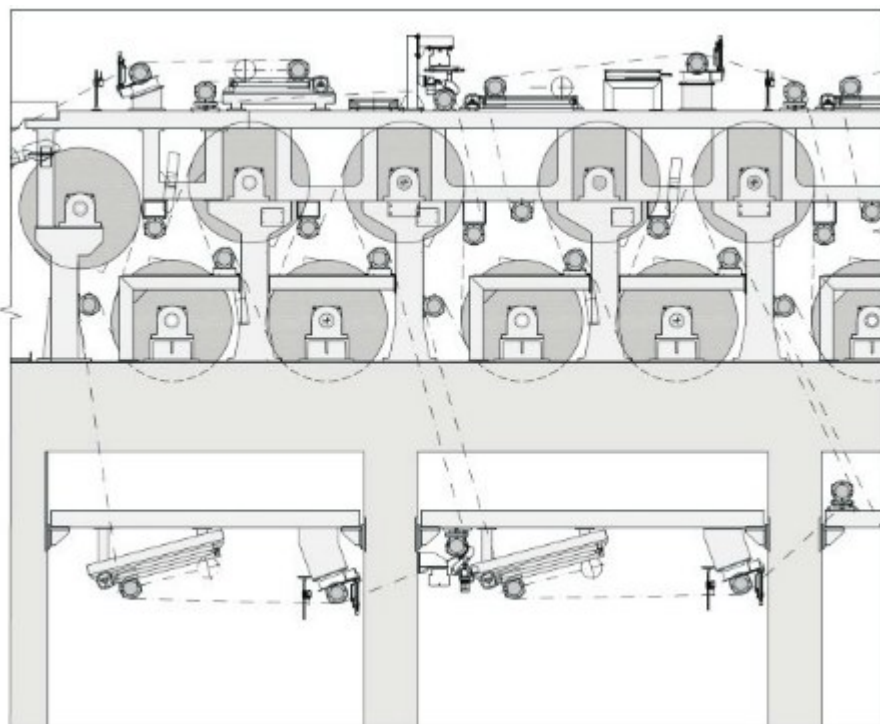
Obr. 1.4: Zobrazení stlačovaného pásu papíru mezi dvěma válci a průběh tlaku [10]

Obsah sušiny v pásu papíru je roven přibližně 17 až 20 %. Obsah sušiny v papírovém pásu je po opuštění lisové sekce 35 až 50 % v závislosti na druhu papíru a konstrukci lisovací sekce. Kombinace lisové geometrie, válců a jejich povrchu musí být přizpůsobena pracovní rychlosti a požadované kvalitě papíru. Zvýšení suchosti za lisovou částí umožní snížit potřeby páry v sušící části.

1.3 Sušící sekce

Pro tuto kapitolu byly informace čerpány dle literatury [2], [9]

Sušení je poslední etapou při procesu výroby papíru. Sušící sekce je jediná část papírenského stroje, která zůstala od svého počátečního vývoje téměř beze změny. Hlavním cílem této sekce je odstranění vody z pásu pomocí vypařování. Tento systém je potřeba vést pokud možno co nejvíce efektivně, hospodárně, rovnoměrně a bez zhoršení kvality papíru. Sušící sekce má největší spotřebu parní energie v celém papírenském stroji, což představuje obvykle kolem 55 % z celkových nákladů na energii. Sušící sekce bývají často uzavřeny kvůli zachování tepla.



Obr. 1.5: Schéma sušící sekce v provedení dvou válců nad sebou [9]

V současné době je typické převážně kontaktní sušení s párou vyhřívanými válci. Sušicí část se dělí na několik průběžných sekcí, které mají své vlastní pohonné systémy. Válce jsou nejčastěji uspořádané v klasickém provedení, čili ve dvou řadách sušicích válců nad sebou s horním a spodním vedením sít (Obr. 1.5)

Sušicí válce jsou vyráběny obvykle v průměrech 1 250, 1 500 a 1 800 mm, délky pak dosahují 8 000 mm. Válec bývá uložen z každé strany v ložiskách; v jedné části se nachází strana pohonu, ke které je přiváděn potřebný výkon pro otáčení válce a v druhé části se nachází strana obsluhy. Do válce je přiváděna horká pára pomocí parní hlavy a tlak ve válcích dosahuje až 160 MPa. Na Obrázku 1.6 je zobrazen částečný průřez tímto parním válcem a jeho uložením.



Obr. 1.6: Částečný průřez parního válce v sušicí sekci [10]

2. Vibrodiagnostika nízkootáčkových ložisek

Pro tuto kapitolu byly informace čerpány dle literatury [3]

Měření pomaloběžných ložisek je velmi obtížné a vyžaduje jak dobře sladěný technický proces, tak také moderní technologie elektronického zpracování. Základem je určení signálů s velmi malou úrovní. Právě u těchto signálů je možné pozorovat vznikající nebo již vzniklou poruchu u valivých ložisek, a to v momentu kontaktu valivého elementu v poškozené části ložiskového kroužku (nebo ložiskové klece).

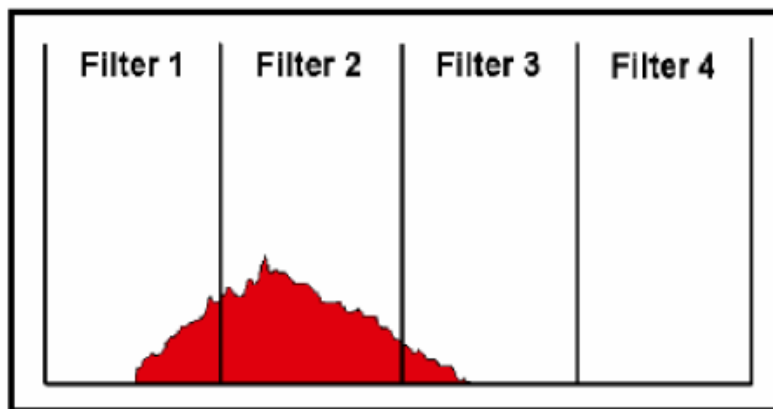
Obtížná detekce signálu je zvláště u papírenských strojů, šroubových transportérů, nebo i natáčecích ložisek. Důvod, proč nelze klasicky monitorovat hladinu vibrací, je ten, že v porovnání s velikostí stroje mají valivé elementy malou hmotnost. Pohyb ložiskového domku, na který působí vyprodukovaná rychlost stroje, je proto velmi malý a snímač vibrací již tuto hodnotu nezachytí.

Je tedy zřejmé, že valivé elementy nedosahují jak dostatečné vzdálenosti pro vyvinutí rychlosti, tak ani potřebnou hmotnost pro přenos energetického pulzu, který by byl kontinuálně měřitelný datakolektorem. Pro získání informací o dějích odehrávajících se v ložisku při pomaloběžném chodu v provozu je tedy vhodné použití algoritmů od firmy SKF Condition Monitoring a k tomu vytvořených datakolektorů CMVA 55 a CMVA 60. Tímto se dosáhne zpracování metodou obálky zrychlení a mohou se tak určit raná poškození takového rozměru, která nemohou být jinak detekována.

2.1 Obálka zrychlení

Pro tuto kapitolu byly informace čerpány dle literatury [3]

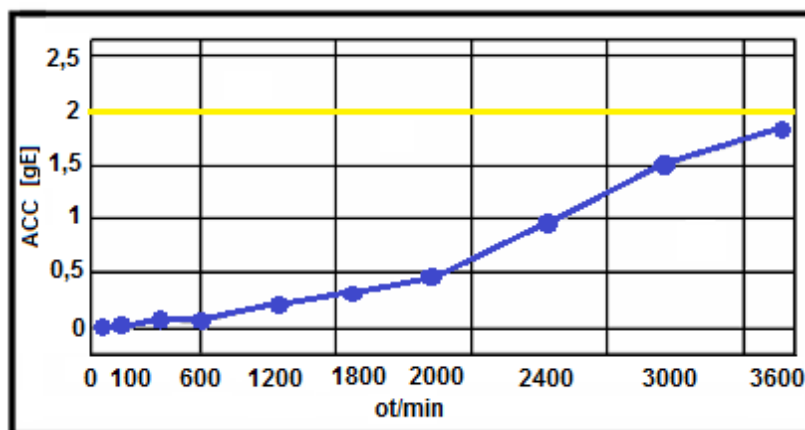
Podstata obálky spočívá v tom, že umožňuje zvýraznění periodického signálu, který vznikl při přechodu valivého elementu poškozenou částí ložiska a současně odfiltruje neperiodické signály. Toho lze dosáhnout použitím jednoho ze čtyř filtrů, který zachytí harmonické energie v odpovídajícím daném rozsahu (Obr. 2.1).



Obr. 2.1: Eventuální rozložení energie u poškozeného pomaloběžného ložiska [3]

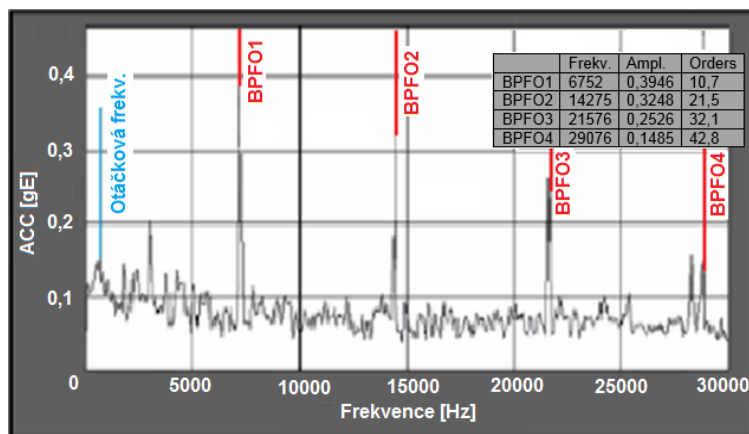
Jak je patrné na Obrázku 2.1, největší energii zachytil druhý filtr, tudíž nejlepší možností bude volba právě tohoto filtru. V aplikaci na dané ložisko je důležité používat tři odečty. U každého měření je třeba použít jiný filtr a vybrat vždy ten nejlepší, protože vhodný může být pokaždé různý. Když už jsou poté energie zachyceny, jsou následně matematicky sečteny a dosáhne se tak zvýrazněného signálu.

U obálkové metody zrychlení je velmi podstatné, že valivé elementy při nízkých otáčkách generují značně menší energii než stejné elementy při otáčkách vyšších. Na Obrázku 2.2 je znázorněn pokus v laboratorních podmínkách s poškozeným ložiskem stejnosměrného motoru, u kterého byly výchozí otáčky $50 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ postupně zvyšovány až na hodnotu $3\,600 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$. Při nejnižších otáčkách dosahovala amplituda zrychlení $0,004 \text{ gE}$, ale při nejvyšších otáčkách byla hodnota již $1,8 \text{ gE}$. V důsledku toho se zvýšila amplituda zrychlení 450 krát. Z toho vyplývá, že při nízkých otáčkách mohou být hodnoty, které by při vyšších otáčkách vyvolaly alarm, daleko nižší.



Obr. 2.2: Závislost amplitudy zrychlení na otáčkách při stejné velikosti závady na vnějším kroužku [3]

Při vyhodnocování je podstatné zjistit ložiskové frekvence a najít je ve frekvenčním spektru. Důležité ve frekvenčním spektru jsou také harmonické signály a jejich násobky. Pokud jsou ve spektru takové harmonické násobky, které nesouvisí například s otáčkami, záběrem zubů, nebo dvojnásobku síťové frekvence, pak jsou patrně důsledkem energie vycházející z poškozeného ložiska. Většinou takové násobky nebývají celá čísla. Překrytím ložiskových frekvenčních násobků se potvrdí, že se jedná o vadu v ložisku (Obr. 2.3).

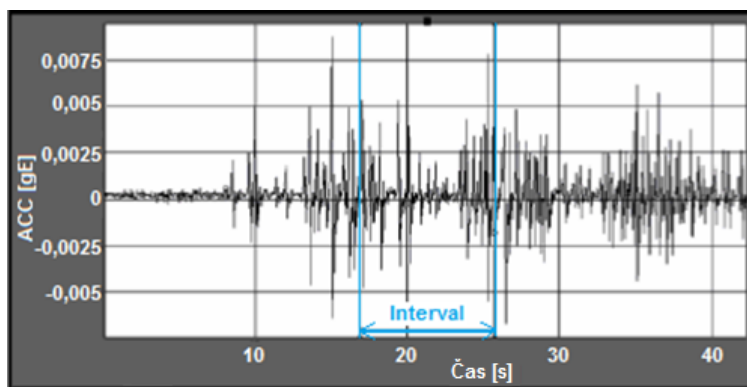


Obr. 2.3: Spektrum obálky zrychlení s proloženými ložiskovými frekvencemi [3]

2.2 Analýza s využitím časového záznamu

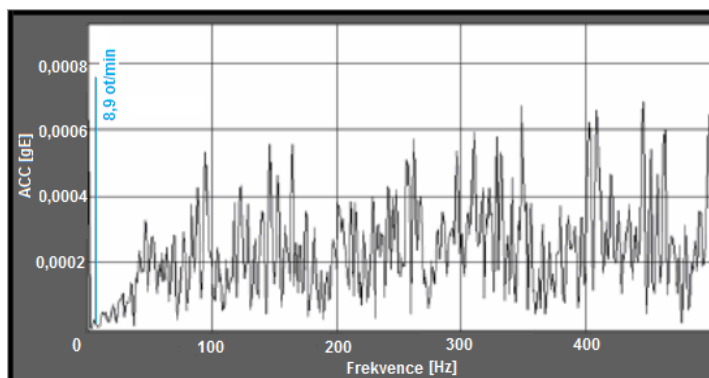
Pro tuto kapitolu byly informace čerpány dle literatury [3]

U pomaloběžných strojů často nebývá dostatek energie pro vyprodukování signálu ve frekvenčním spektru. V takových případech je vhodné detekovat závady v ložisku pomocí časového záznamu (Obr. 2.4). Je však důležité naměřit dostatečně dlouhou časovou vlnu, aby valivé elementy přešly přes závadu minimálně šestkrát. Jestliže nastane situace, že se ložisko nemůže otočit o 360° , je možné použít trendování amplitudy.



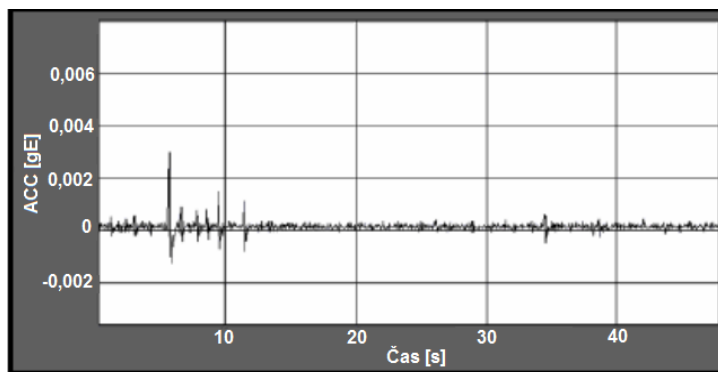
Obr. 2.4: Časový záznam pro poškozené ložisko [3]

Podstatou časového záznamu je nalézt rázy energie ve spektru. Pomocí umístění značkovačů přibližně uprostřed rázu je možné změřit časový interval mezi rázy a dostat tak frekvenci. Pokud valivý prvek přechází přes závadu, vytvoří se ráz energie a z času mezi těmito rázy je možné získat frekvenci. Na Obrázku 2.4 je také patrné, že tyto rázy neprobíhaly od začátku měření. Je to způsobeno válečky, které nebyly v přímém kontaktu s ložiskovým kroužkem z důvodů dilatace.

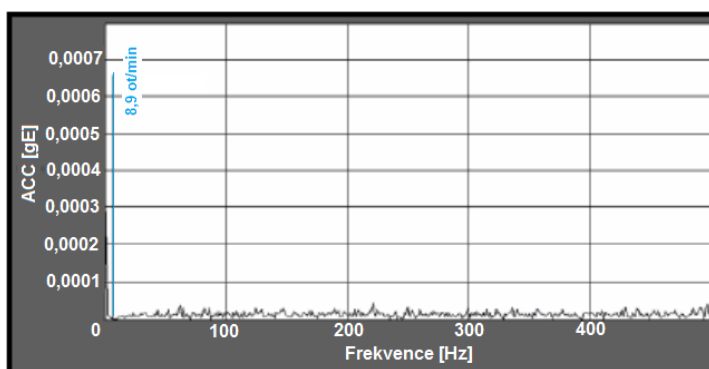


Obr. 2.5: Frekvenční spektrum poškozeného ložiska [3]

Z tohoto časového záznamu bylo poté vytvořeno frekvenční spektrum (Obr. 2.5), kde je již zřejmé poškození ložiska. Pro srovnání je na obrázku 2.6 zobrazen časový záznam pro nové ložisko a na obrázku 2.7 je pak frekvenční spektrum rovněž pro nové ložisko.



Obr. 2.6: Časový záznam pro nové ložisko [3]



Obr. 2.7: Frekvenční spektrum nového ložiska [3]

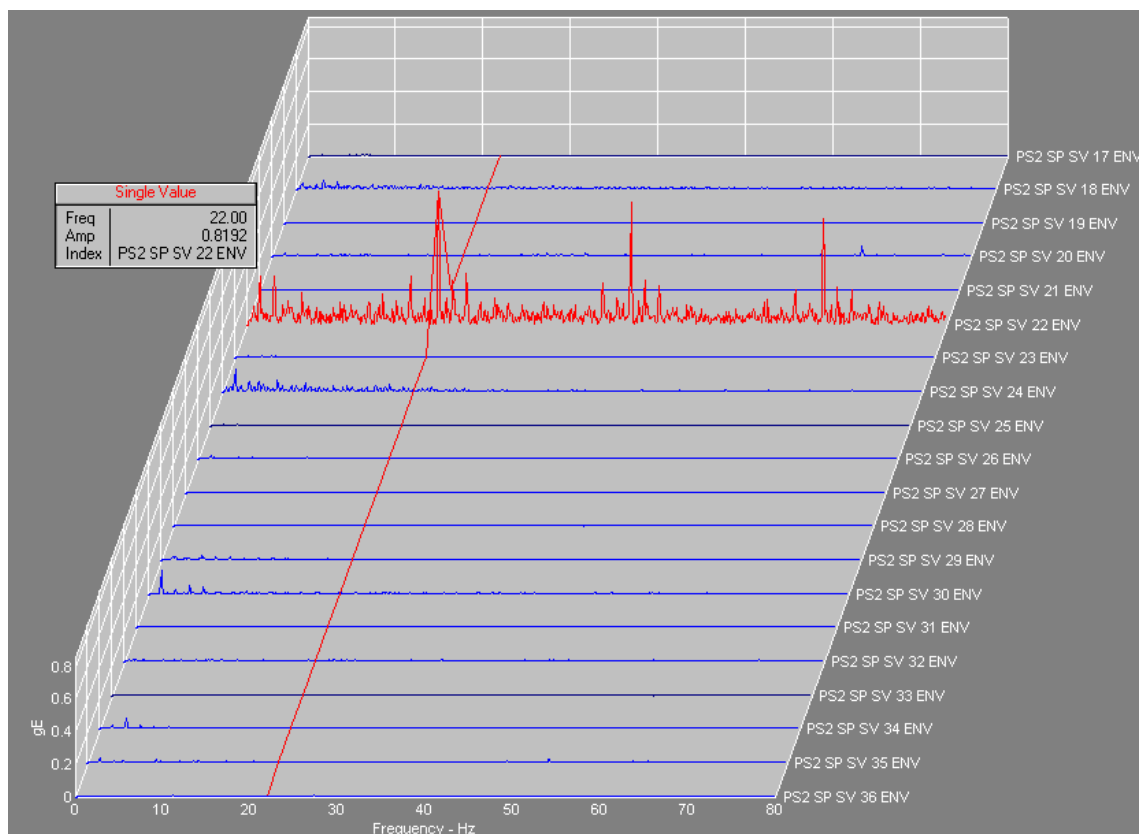
3. Poškozená ložiska u papírenských strojů a jejich detekce

Jak již bylo dříve zmíněno, vibrodiagnostika pomaloběžných ložisek je problematická a je potřeba znát jak projevy poškozeného ložiska, tak i vývoj poruchy od samého počátku a s tím i spojenou prognózu zbytkové životnosti, tedy naplánování odstávky a výměnu ložiska.

3.1 Poškozená ložiska u pomaloběžných papírenských strojů

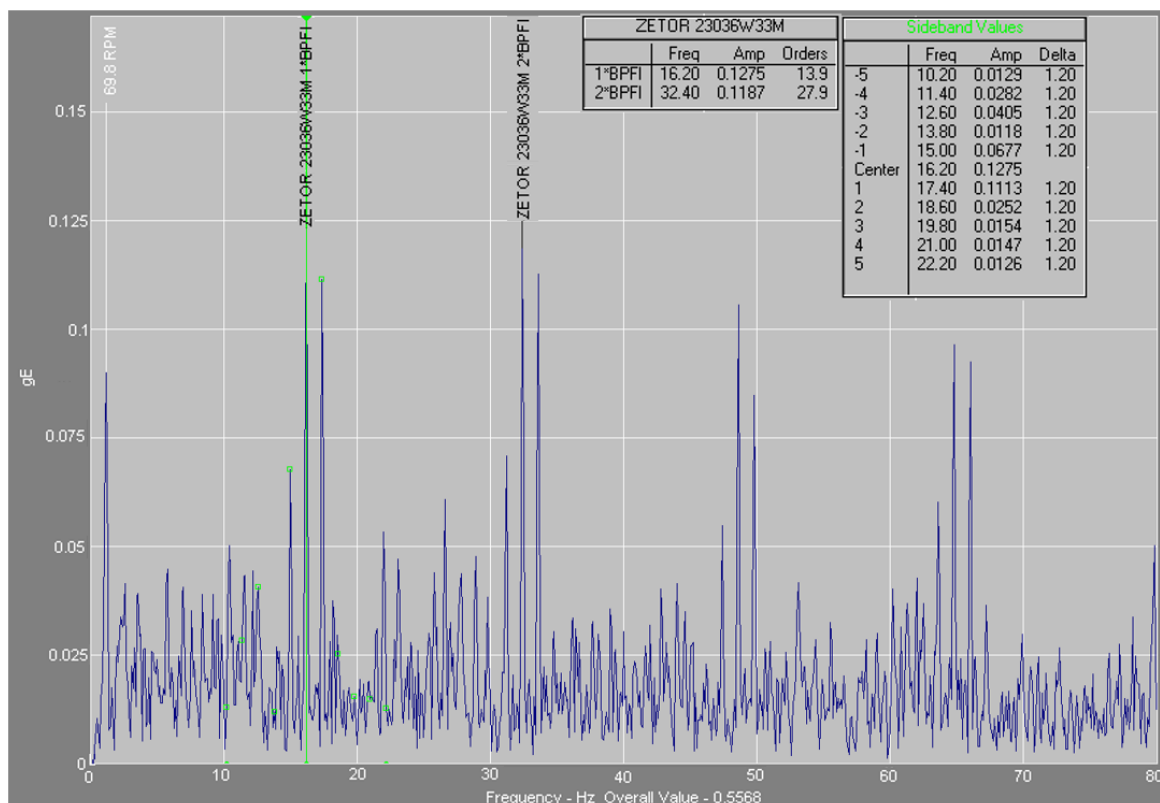
Pro tuto kapitolu byly informace čerpány dle literatury [12]

Za účelem transparence poškozeného ložiska u pomaloběžných papírenských strojů bylo vybráno ložisko ze strany pohonu na sušícím válci číslo 22. Ložisko bylo sledováno v raném stádiu poškození od července 2014 až do září 2014, kdy proběhla jeho výměna. Jaké hodnoty nabývalo ložisko v obálce zrychlení vůči ostatním ložiskům v době před výměnou je nejlépe patrné na kaskádovitém spektru (Obr. 3.1).



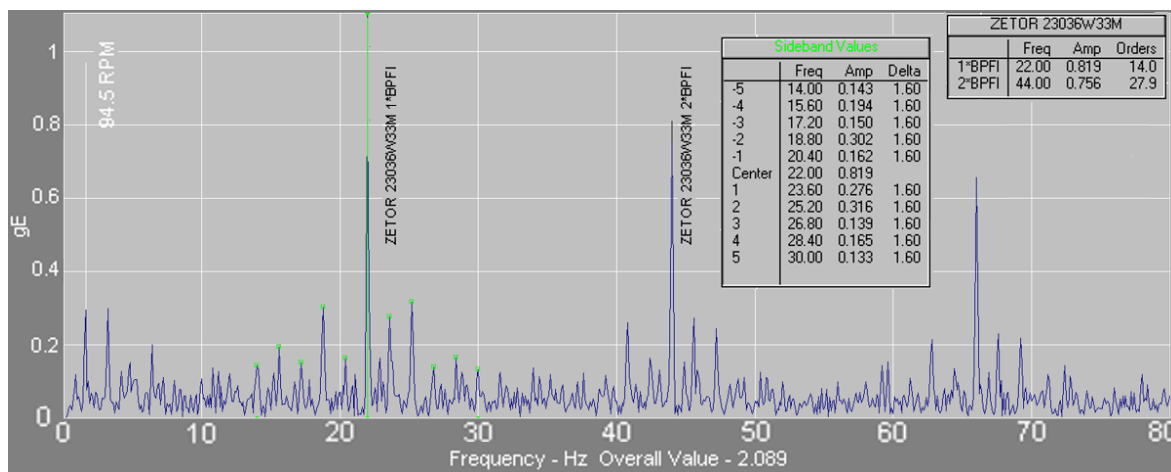
Obr. 3.1: Frekvenční spektra obálek zrychlení sušících válců ze strany pohonu, září 2014.

Červenou barvou je vyznačeno poškozené ložisko oproti modrým nepoškozeným [12]



Obr. 3.2: Frekvenční spektrum obálky zrychlení počáteční vady ložiska, červenec 2014 [12]

Na Obrázku 3.2 je zachycena začínající závada na ložisku. Amplitudy obálky zrychlení jsou zatím velmi malé, lze ale již pozorovat jasné špičky, které při překrytí ložiskovými frekvencemi BPFI indikují závadu na vnitřním kroužku. Na Obrázku 3.3 je již možné pozorovat závadu na vnitřním kroužku v pokročilém stádiu, kdy dosáhlo ložisko alarmových mezí a je potřeba provést výměnu. Při srovnání frekvenčního spektra z července a o dva měsíce později ze září je patrné, že hodnoty jsou téměř 7 krát vyšší.

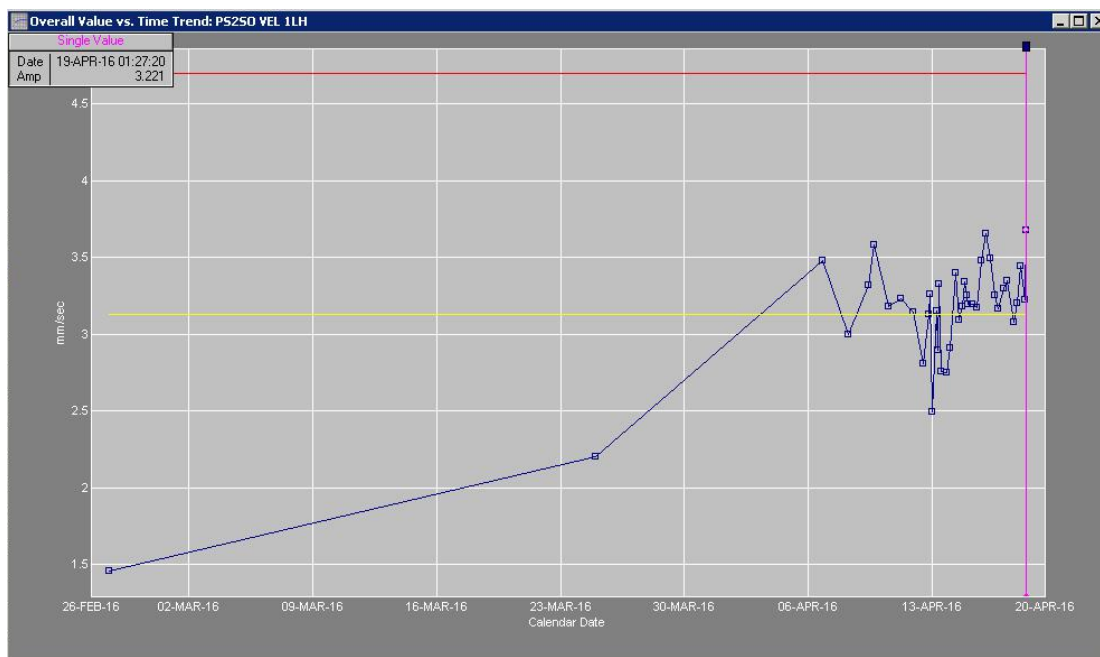


Obr. 3.3: Frekvenční spektrum obálky zrychlení poškozeného ložiska, září 2014 [12]

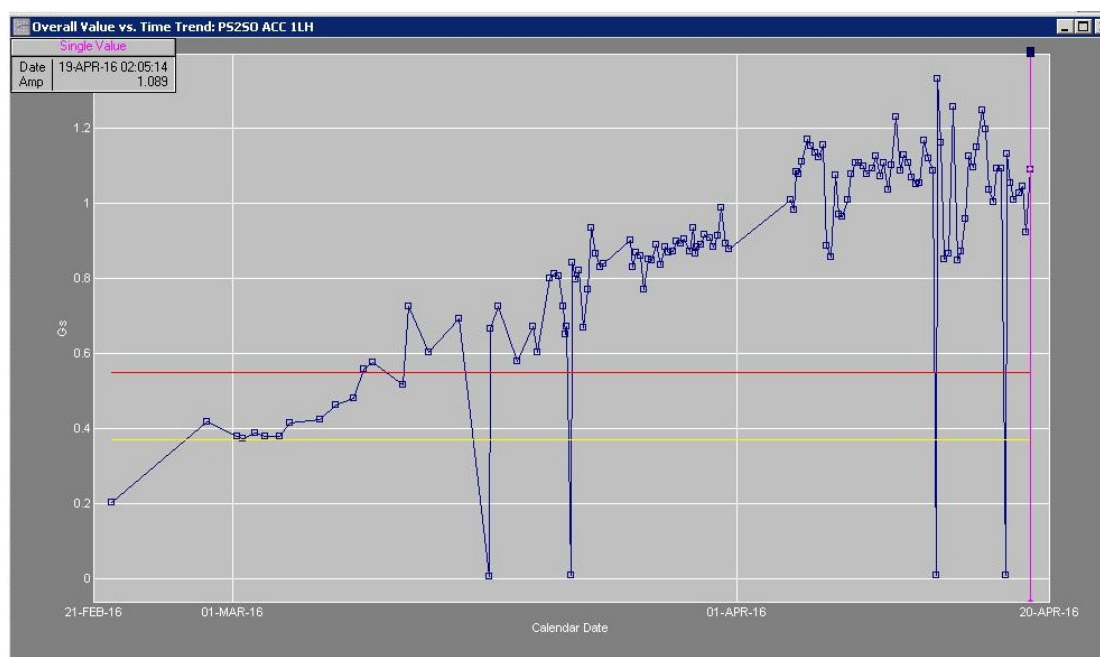
3.1.1 Poškozené ložisko prvního horního lisu

Pro tuto kapitolu byly informace čerpány dle literatury [13]

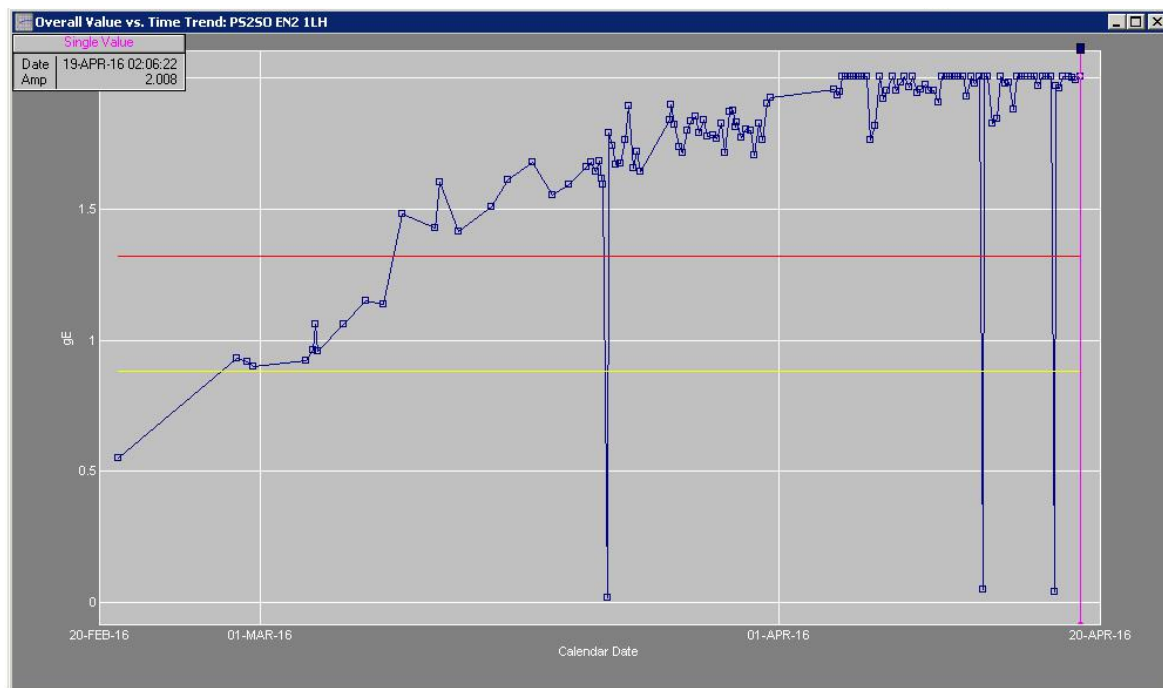
U tohoto ložiska na straně obsluhy bylo zjištěno začínající poškození koncem února 2016 a poté bylo sledováno až do 19 dubna 2016, kdy byla provedena jeho výměna. Na následujících obrázcích (Obr. 3.4 až 3.9) je zobrazen trendový vývoj vibrací měřených parametrů: rychlosti, zrychlení a obálky zrychlení s filtrem 2 a 3.



Obr. 3.4: Trendový vývoj hodnot rychlosti [13]

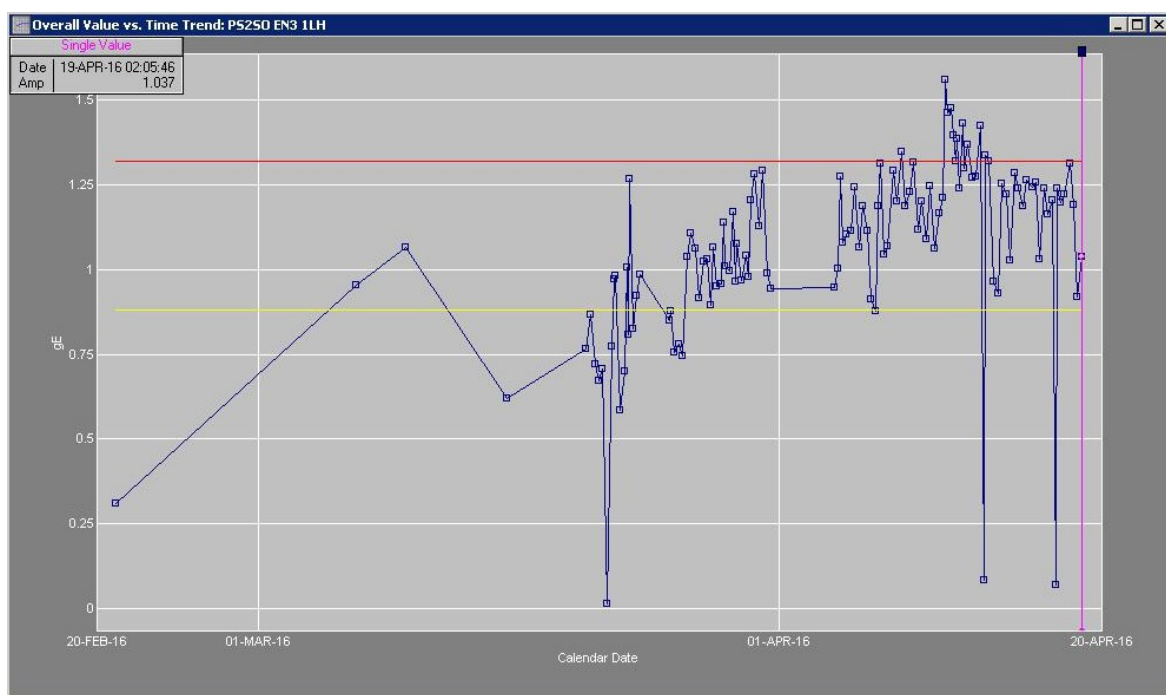


Obr. 3.5: Trendový vývoj hodnot zrychlení [13]



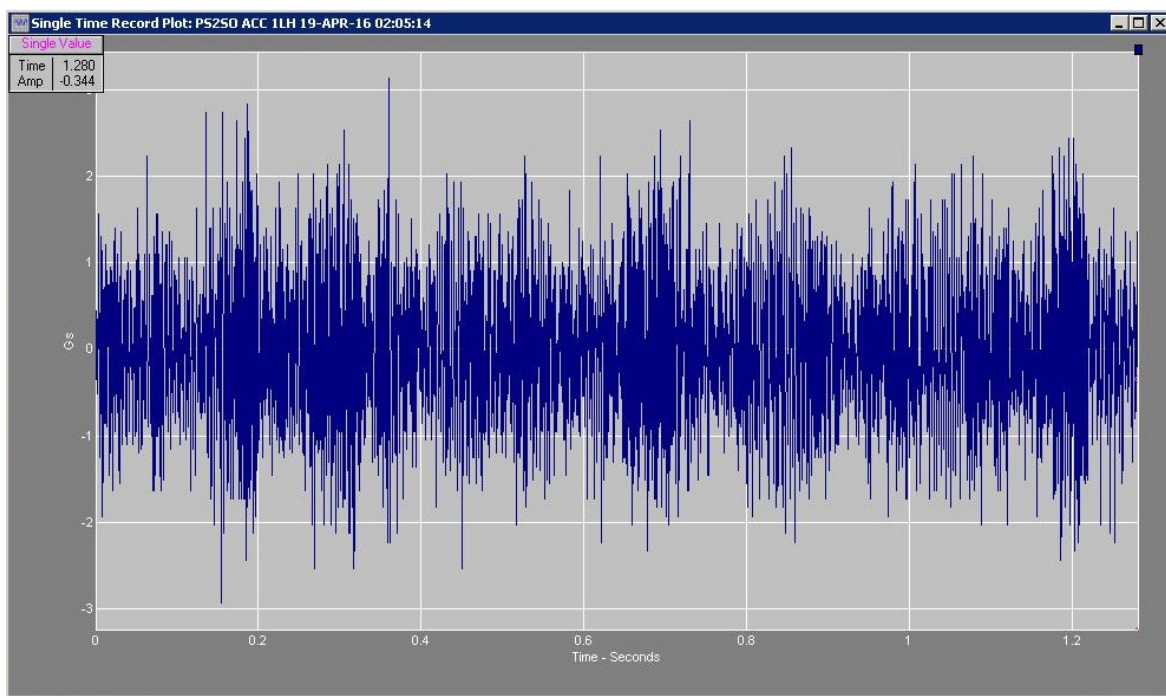
Obr. 3.6: Trendový vývoj hodnot obálky s filtrem 2. Špičky zde přesahují hodnotu 2 gE, proto nejsou zobrazeny v rozmezí grafu [13]

Na trendu je patrné, že vývoj není tak úplně lineární, ale že hodnoty různě oscilují. Naměřené údaje, které jsou rovny nule, znamenají, že papírenský stroj nebyl v provozním režimu a byl odstaven. Při srovnání je patrné, že poruchu v rané fázi odhalí spíše zrychlení a obálky zrychlení než rychlost.

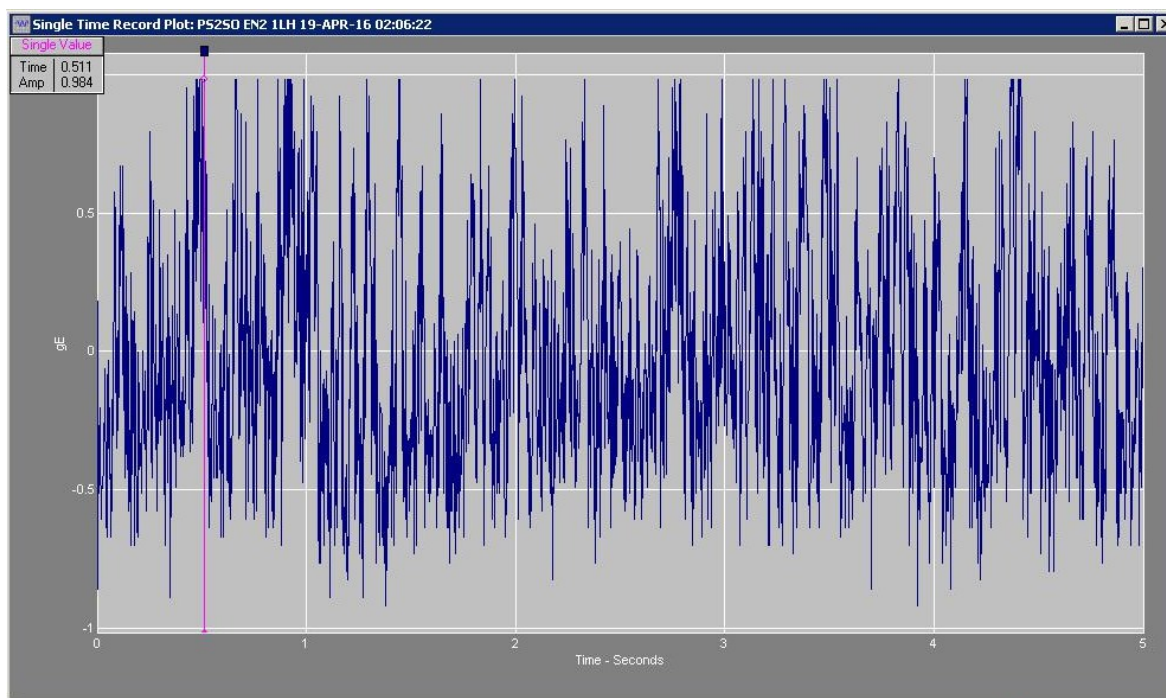


Obr. 3.7: Trendový vývoj hodnot obálky s filtrem 3 [13]

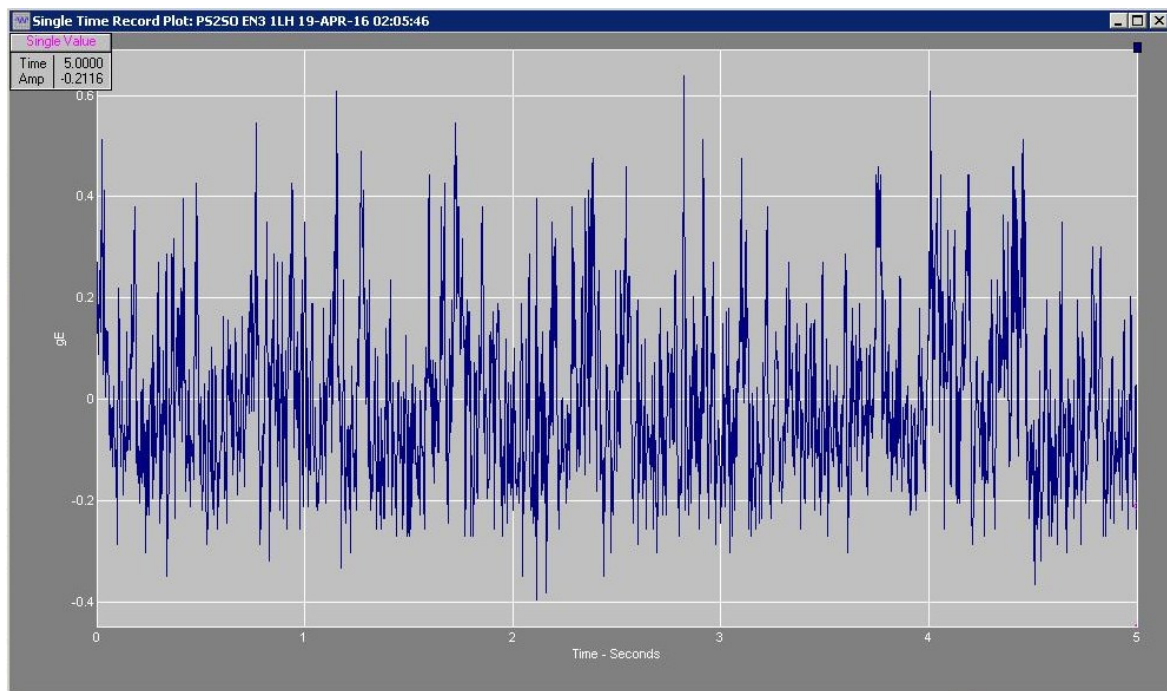
Naměřeny byly také časové záznamy zrychlení (Obr. 3.8) obálky zrychlení s filtrem 2 (Obr. 3.9) a obálky zrychlení s filtrem 3 (Obr. 3.10). Časový záznam byl naměřen den před opravou, lze tedy pozorovat poškozené ložisko v koncové životnosti.



Obr. 3.8: Časový záznam zrychlení ke dni 19. 04. 2016 [13]

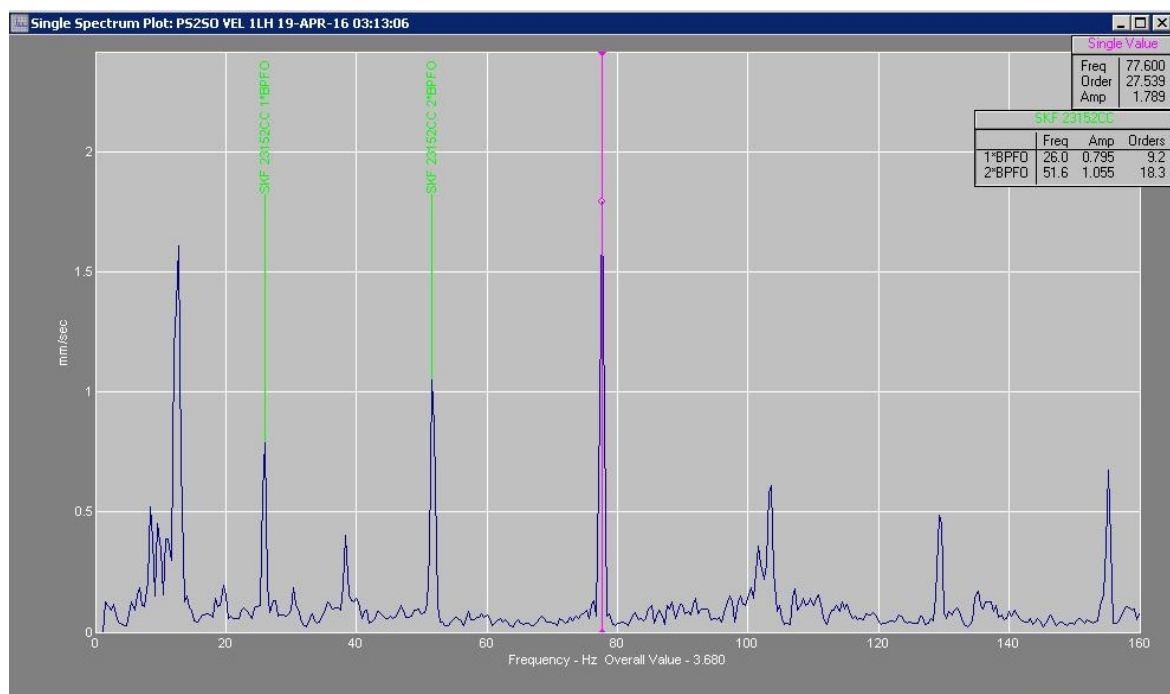


Obr. 3.9: Časový záznam obálky zrychlení s filtrem 2 ke dni 19. 04. 2016. Špičky přesahují hodnotu 1 gE, proto nejsou zobrazeny v daném rozmezí grafu [13]

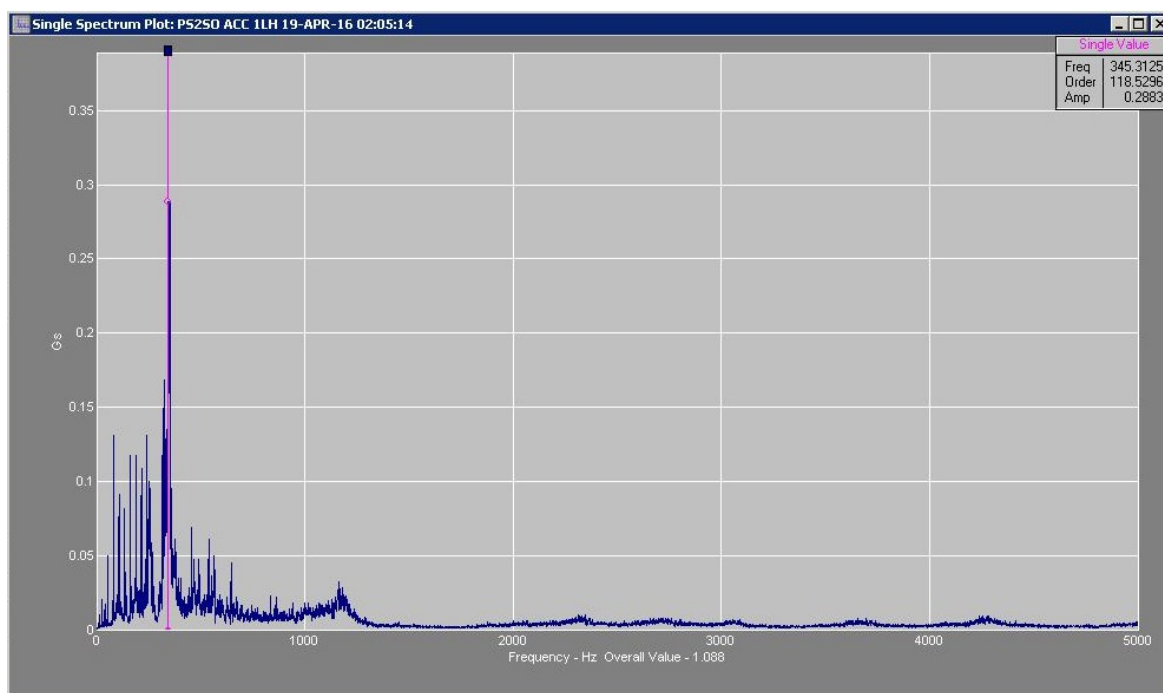


Obr. 3.10: Časový záznam obálky zrychlení s filtrem 3 ke dni 19. 04. 2016. [13]

Hlavní informace o stavu ložiska nesou frekvenční spektra. Měřena byla spektra rychlosti (obr. 3.11), zrychlení (obr. 3.12), obálky zrychlení s filtrem 2 (obr. 3.12) a obálky zrychlení s filtrem 3 (obr. 3.11).

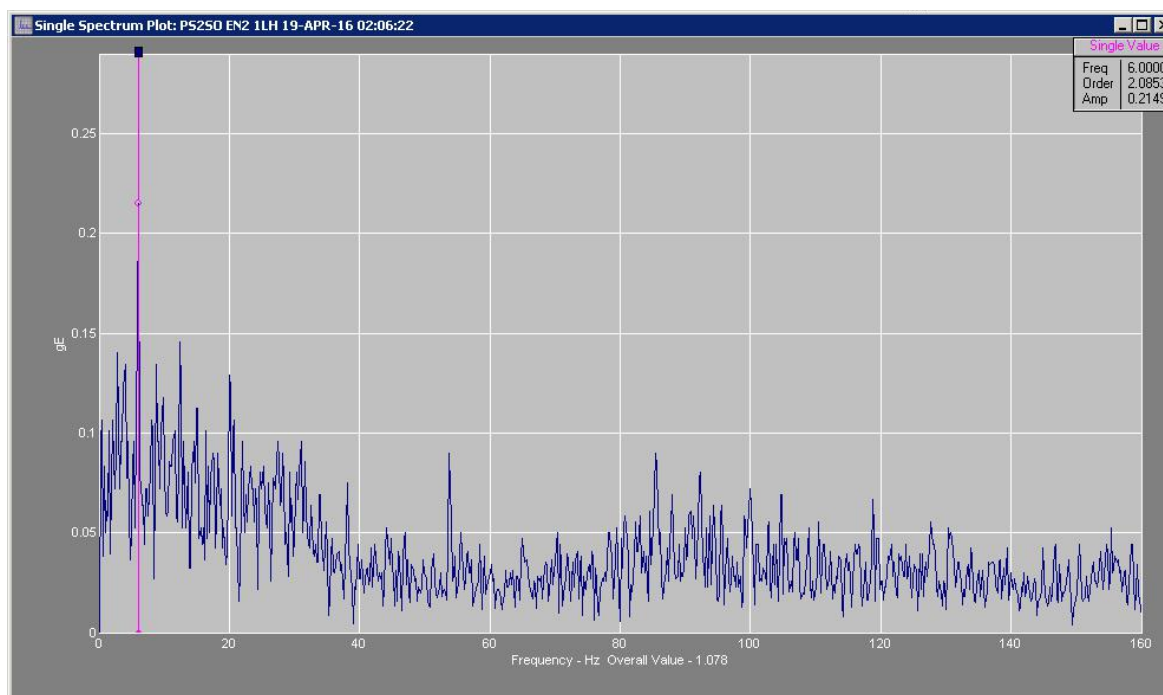


Obr. 3.11: Frekvenční spektrum rychlosti s proloženými frekvencemi vnějšího kroužku ložiska ke dni 19. 04. 2016. [13]

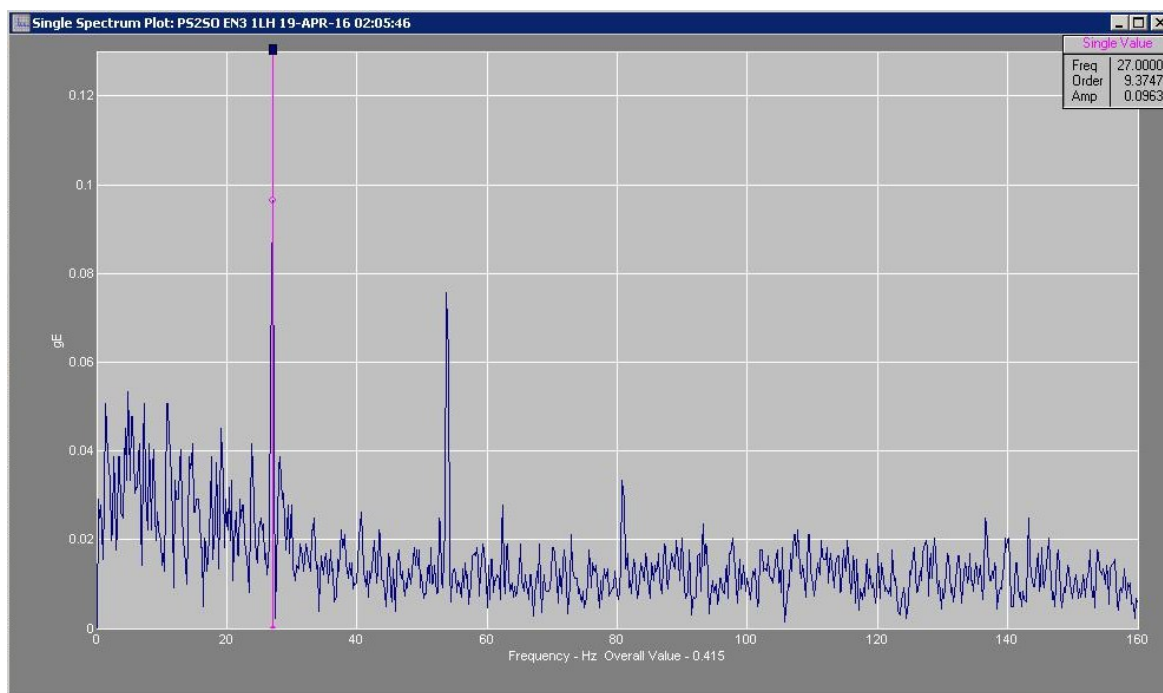


Obr. 3.12: Frekvenční spektrum zrychlení ke dni 19. 04. 2016. [13]

V pokročilé fázi poruchy většinou platí, že větších hodnot nabývají veličiny rychlosti a zrychlení. Je tomu tedy naopak, než u rané fáze poruchy, kde byly průkaznější obálky zrychlení s filtrem 2 a 3.

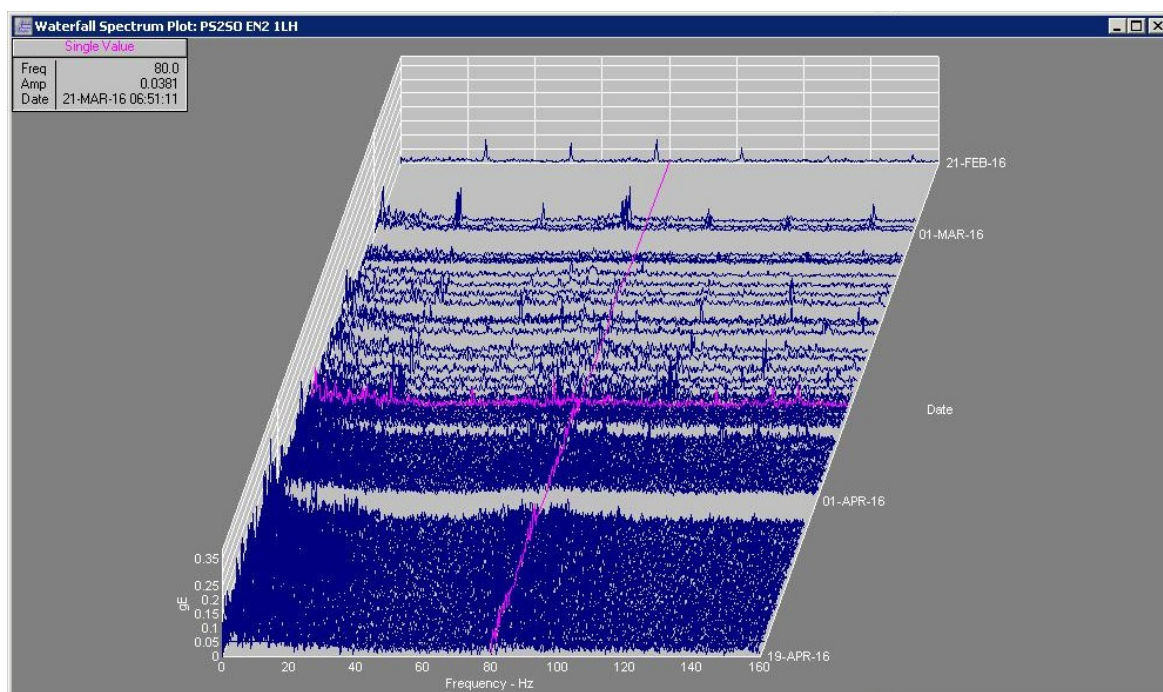


Obr. 3.12: Frekvenční spektrum obálky zrychlení s filtrem 2 ke dni 19. 04. 2016. [13]



Obr. 3.12: Frekvenční spektrum obálky zrychlení s filtrem 3 ke dni 19. 04. 2016. [13]

Zajímavé porovnání také přináší kaskádovité spektrum obálky zrychlení s filtrem 2 na Obrázku 3.13, kde lze sledovat spektrum frekvence v čase.



Obr. 3.13: Kaskádovité spektrum obálky zrychlení s filtrem 2 [13]

3.2 Poškozená ložiska u rychloběžných papírenských strojů

Pro tuto kapitolu byly informace, fotodokumentace a frekvenční spektra získány od firmy, která si nepřeje uveřejnit své jméno.

Díky vyšším otáčkám jsou vibrodiagnostická měření rychloběžných papírenských strojů jednodušší ve zpracování dosažených informací (signálů). Stále ale platí, že je potřeba pracovat s malými frekvencemi, mít pro to odpovídající vybavení a zkušenosti. Na Obrázku 3.4 je vyfoceno ložisko NU2217E od firmy SKF s poškozeným vnějším kroužkem.

Část vnějšího kroužku byla odlomena v poměrně velkém kusu, takže ložisko drželo pohromadě a nedošlo tak k závažnějšímu poškození, než by tomu bylo při odlomení malých částí, které by se dostaly mezi válečky a mohly tak způsobit zadření ložiska a tím i havárii stroje. Dva valivé elementy byly odděleny až po demontáži ložiska.



Obr. 3.4: Poškození ložiska rychloběžného papírenského stroje, kdy došlo k odlomení části vnějšího kroužku.

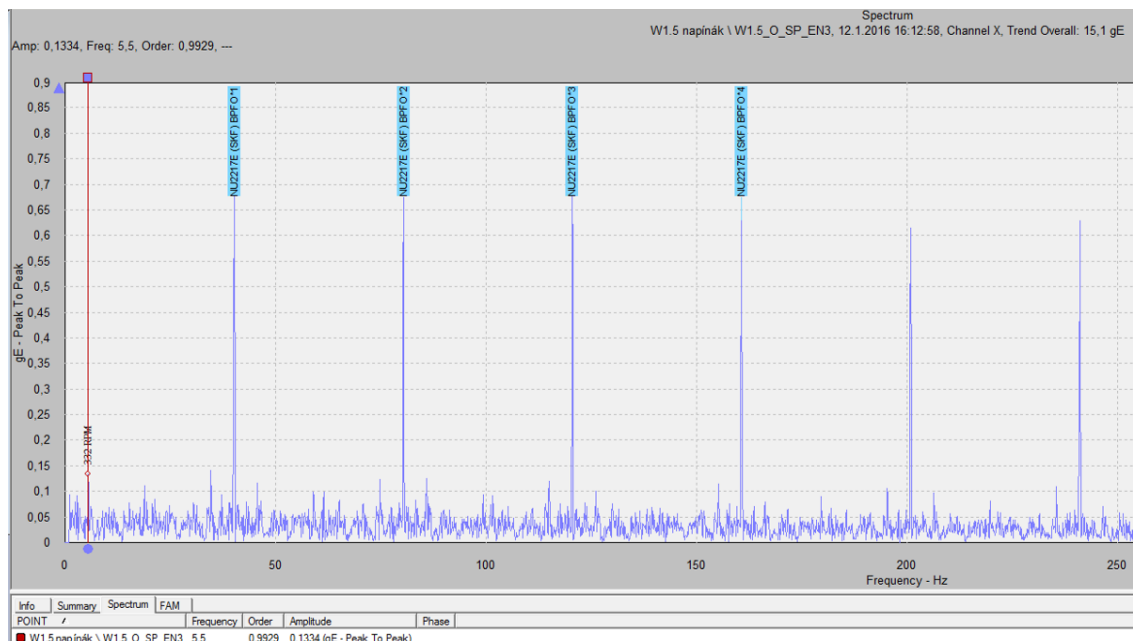
Na Obrázku 3.5 je podrobný detail takto poškozeného ložiska. Je zde patrný pitting v pokročilém stádiu, kdy dochází k odlamování povrchových struktur materiálu. Valivé elementy přecházející přes tuto poruchu vyvozovaly rázy, až došlo k utržení části vnějšího kroužku.

Za povšimnutí stojí i mazivo, které je smícháno s vodou a louhem (5 % vodný roztok hydroxidu sodného). Louh s vodou je používán pro louhování systému, čili čištění systému nátoku, síta a lisů. V případě proniknutí vody a louhu do ložiska a smíchání s mazivem vzniká mazací tuk, který je pro mazání nežádoucí.

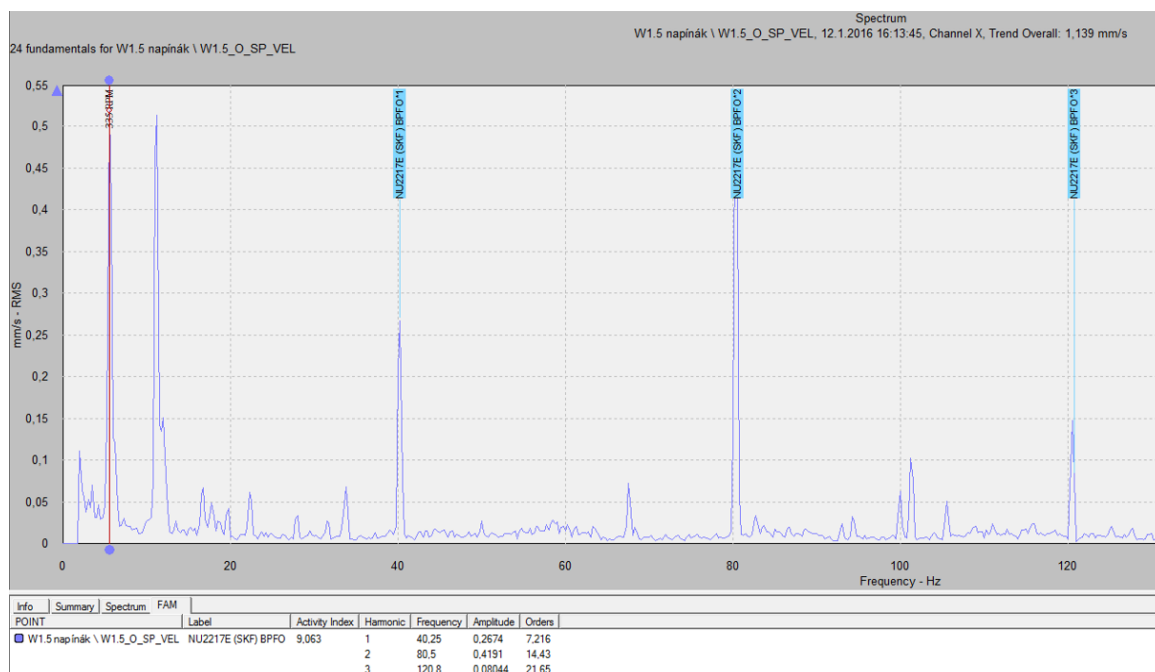


Obr. 3.5: Detailní poškození vnitřního kroužku ložiska

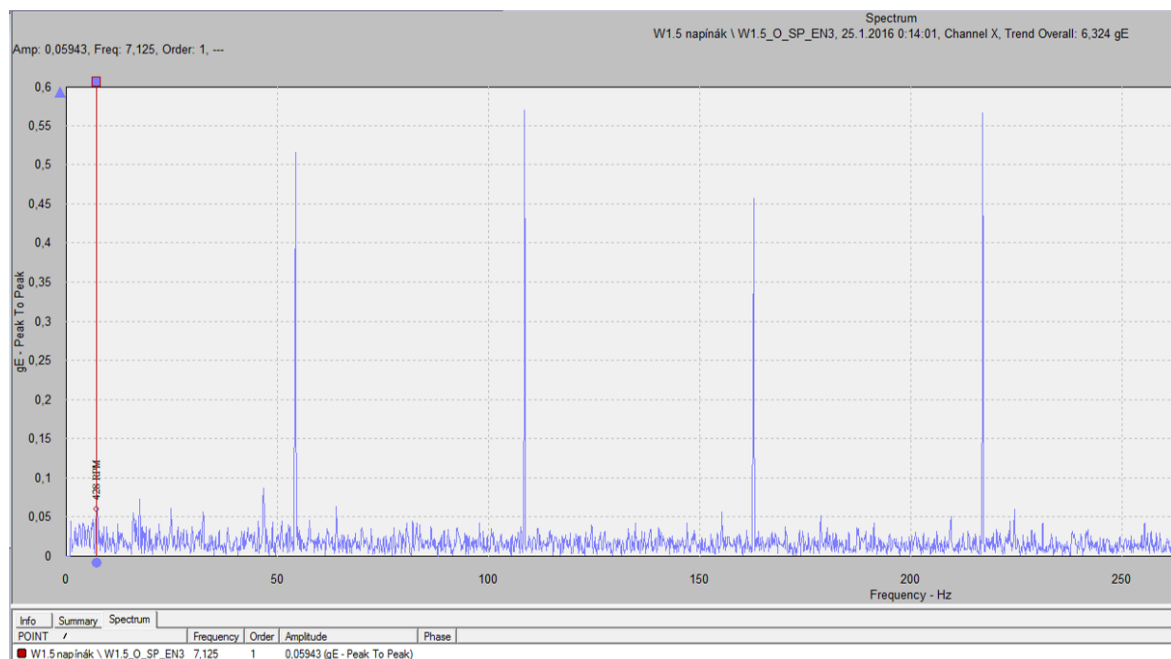
Ložisko bylo sledováno od začínajícího poškození v počátku ledna 2016 až po konec února 2016. Monitorováno bylo průměrně jedenkrát za dva týdny, ale k blížícímu se termínu výměny ložiska to již bylo častěji. Měřeny byly hodnoty obálky zrychlení s filtrem 3 a hodnoty rychlosti. Následně bylo na začátku března vyjmuto s již avizovaným prasklým vnějším kroužkem. Na Obrázku 3.6 až 3.17 je zobrazen vývin a projev závady ve frekvenčním spektru.



Obr. 3.6: Frekvenční spektrum obálky zrychlení s filtrem 3, viditelné špičky jsou proloženy násobky frekvencemi vnějšího kroužku ložiska 12. 1. 2016

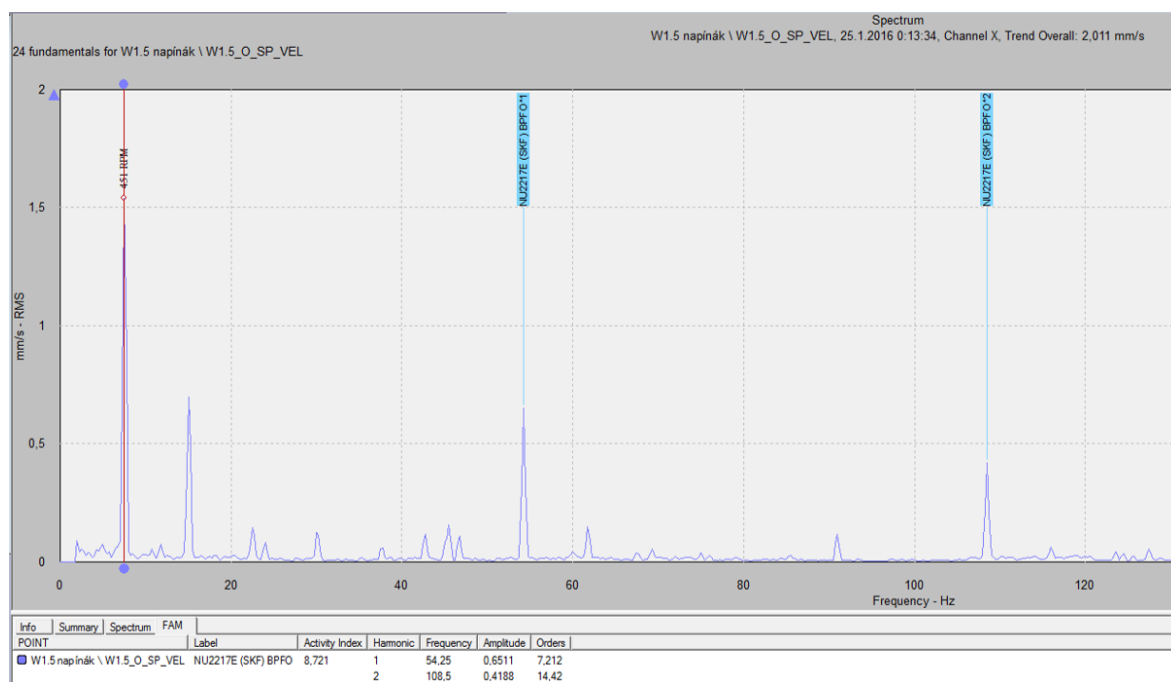


Obr. 3.7: Frekvenční spektrum obálky rychlosti s vyznačenou otáčkovou frekvencí a frekvencemi vnějšího kroužku ložiska 12. 1. 2016

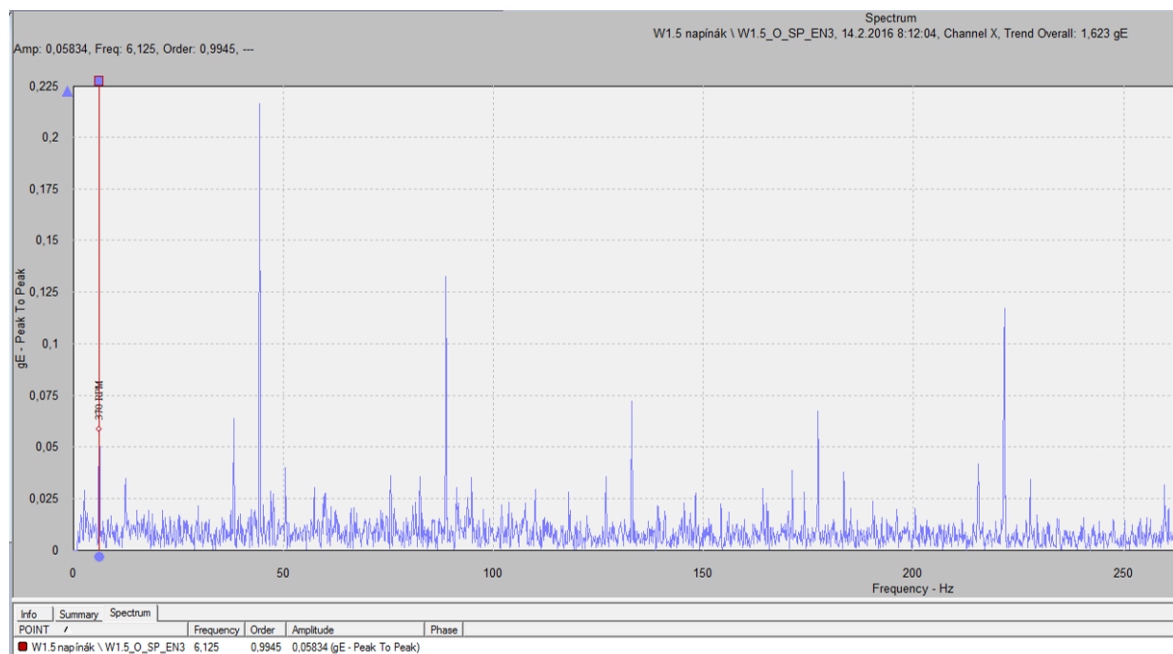


Obr. 3.8: Frekvenční spektrum obálky zrychlení s filtrem 3, dominantní špičky ve spektru jsou opět frekvence vnějšího kroužku ložiska 25. 1. 2016

Při srovnání frekvenčních spekter z těchto dvou měsíců můžeme pozorovat nepatrné snížení hodnoty obálky zrychlení s filtrem 3. U rychlosti nastal téměř dvojnásobný nárůst hodnot a posun harmonických frekvencí jak u obálky zrychlení s filtrem 3, tak u rychlosti.

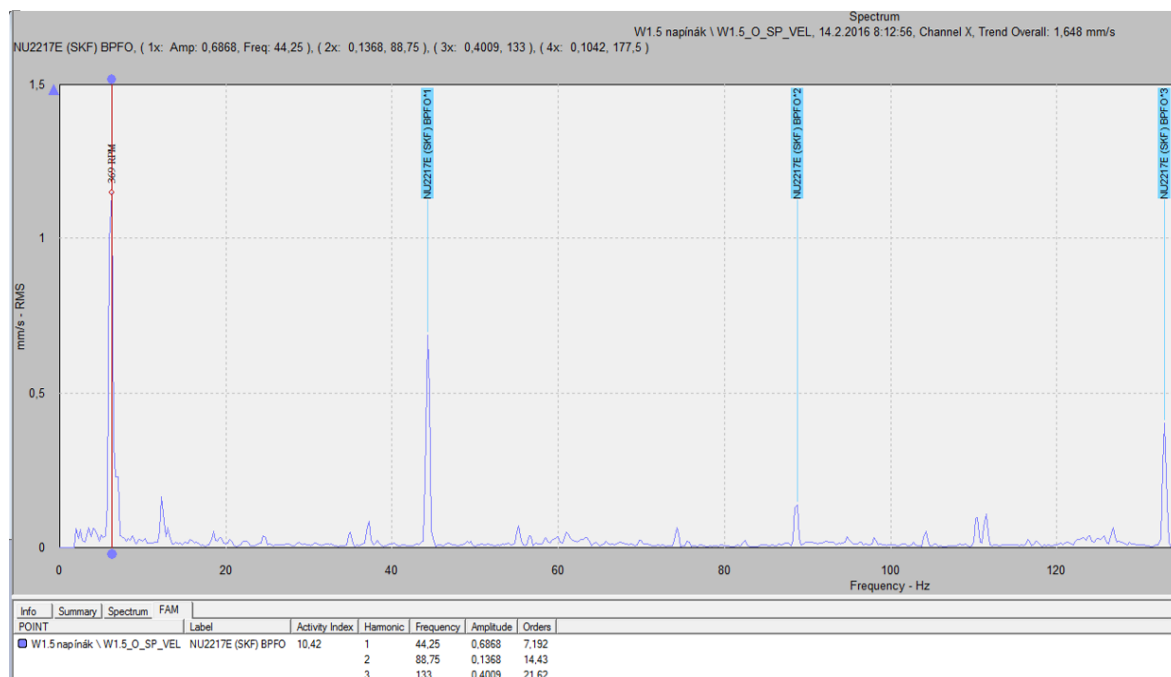


Obr. 3.9: Frekvenční spektrum obálky rychlosti s vyznačenými frekvencemi vnějšího kroužku ložiska a otáčkové frekvence 25. 1. 2016

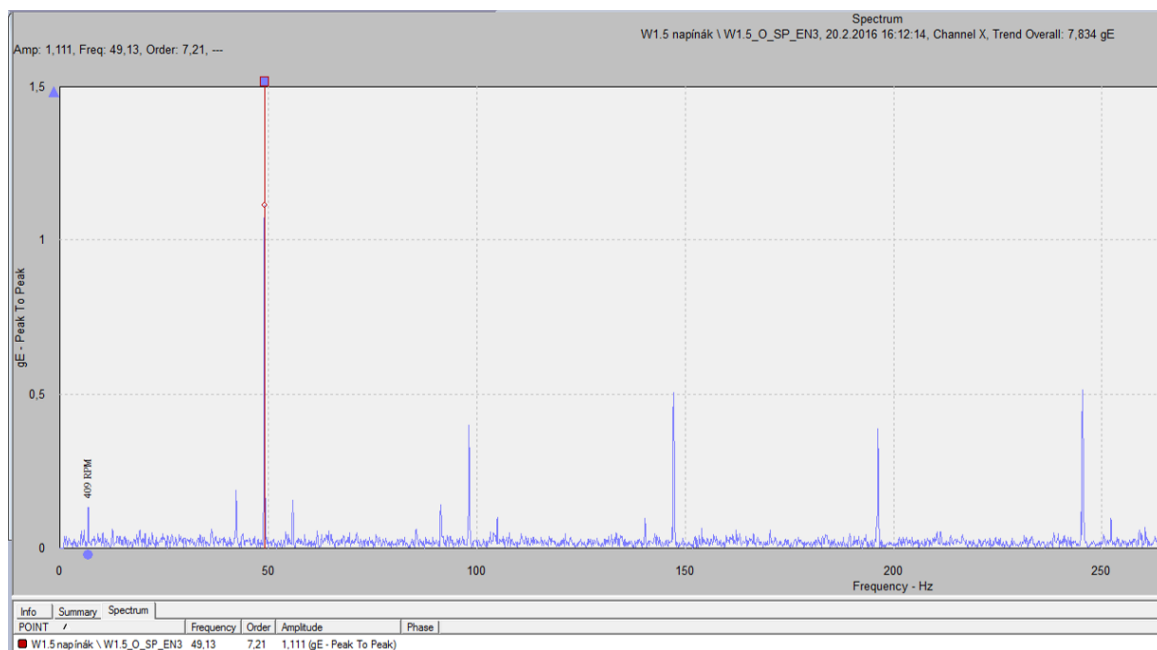


Obr. 3.10: Frekvenční spektrum obálky zrychlení s filtrem 3, patrný je zvyšující se šum, který signalizuje zvyšující se poškození ložiska 14. 2. 2016

U srovnání předchozích a stávajících amplitud je patrný značný pokles jak u obálky zrychlení s filtrem 3, tak i u hodnot rychlosti. Je to způsobeno tím, že výrobní otáčky se snížily z minulých $450 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ na současných $370 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Je tedy zřejmé, že hodnoty amplitudy nabývají nižších hodnot, ale špičky jsou pořád patrné.

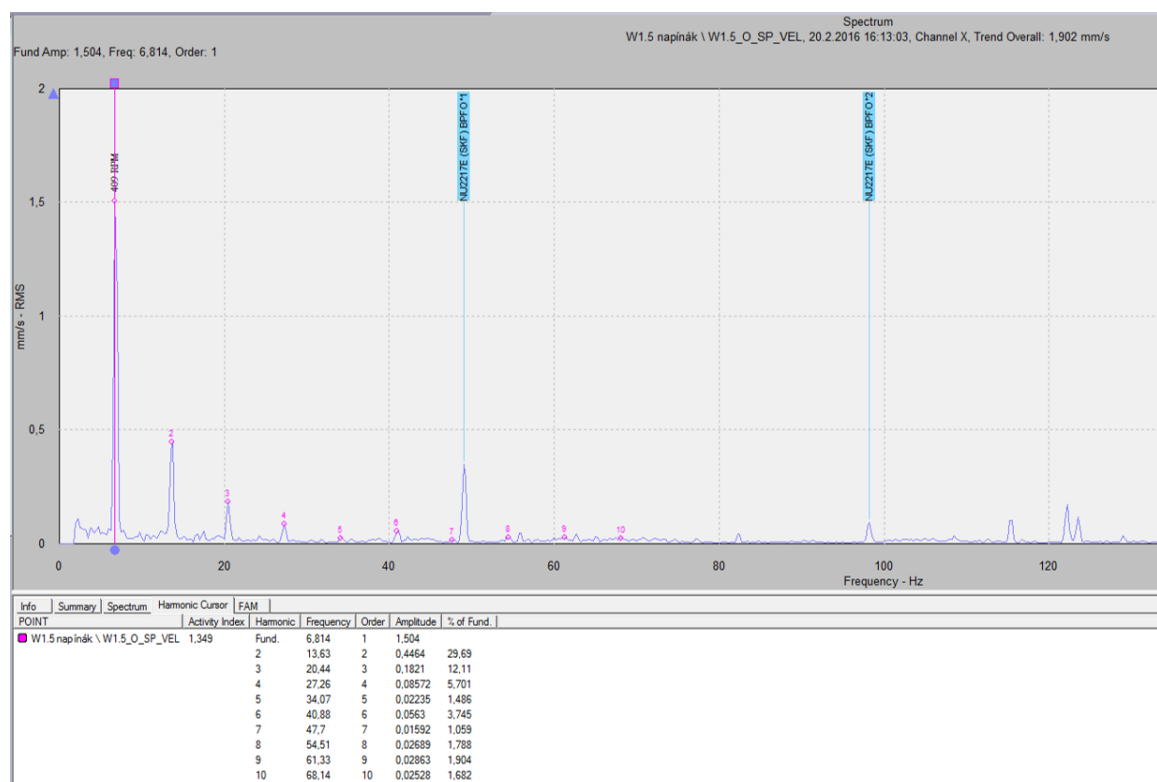


Obr. 3.11: Frekvenční spektrum obálky rychlosti, dominuje zde výrazná špička otáčkové frekvence a frekvence vnějšího kroužku ložiska 14. 2. 2016

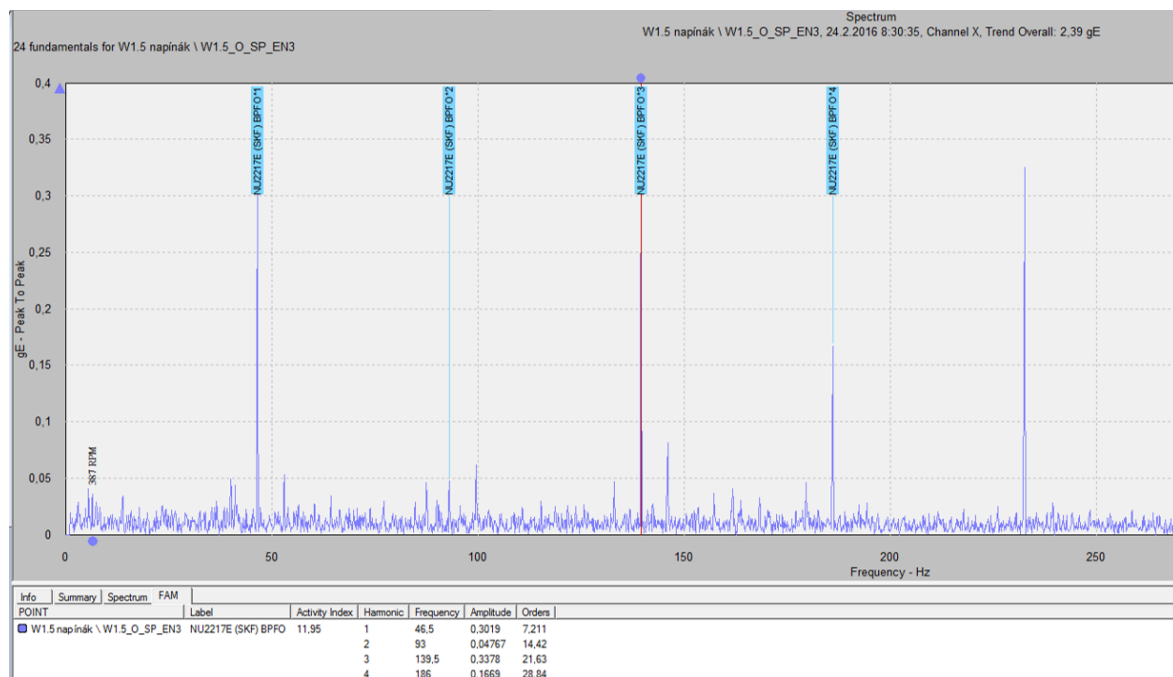


Obr. 3.12: Frekvenční spektrum obálky zrychlení s filtrem 3, vyznačena nejvyšší špička s hodnotou 1,1 gE 20. 2. 2016

Na těchto dvou frekvenčních spektrech byly v době měření otáčky $409 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, což znamená i zvýšení amplitud vibrací. Je možné pozorovat dominantní harmonické špičky ve spektrech, které znamenají zvětšování poškození ložiska.

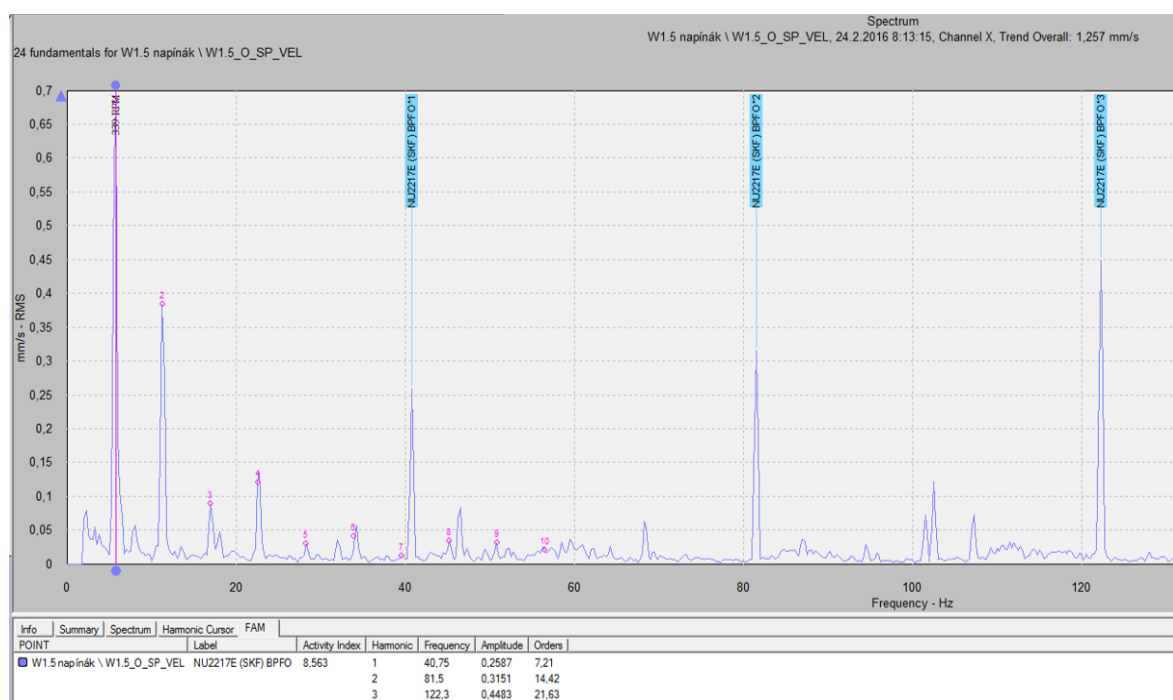


Obr. 3.13: Frekvenční spektrum obálky rychlosti, na spektru jsou vyznačeno 10 řádů, které signalizují poškozené ložisko 20. 2. 2016

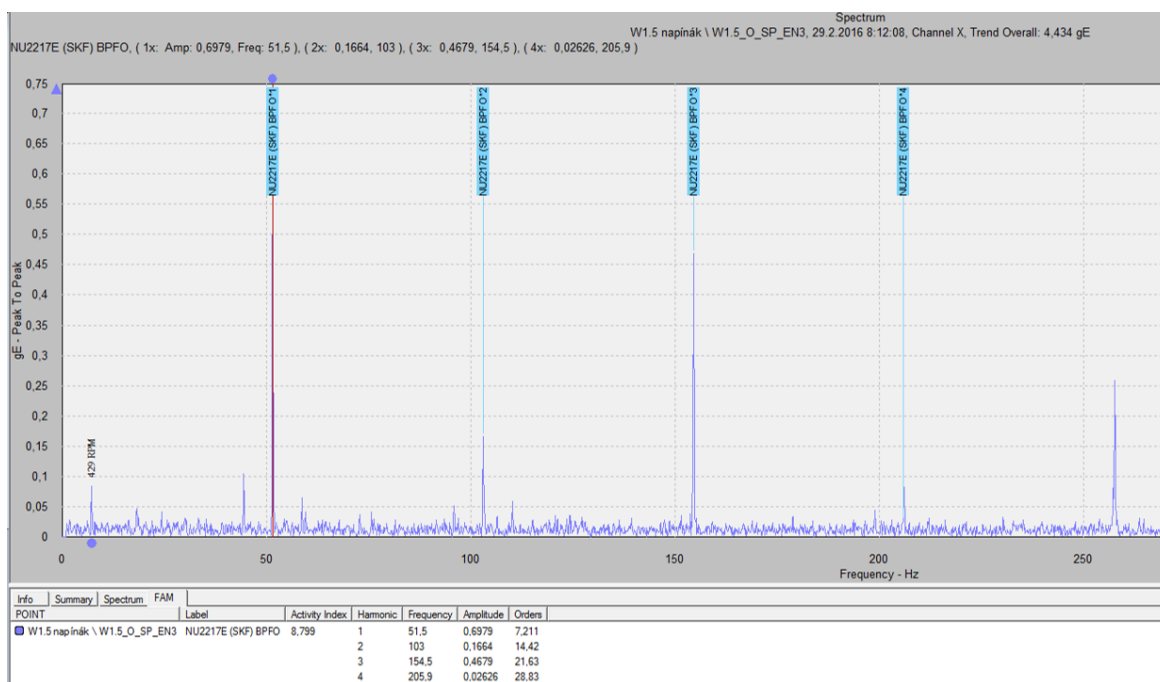


Obr. 3.14: Frekvenční spektrum obálky zrychlení s filtrem 3, ve spektru je patrný výrazný šum okolo špiček frekvencí vnějšího kroužku ložiska 24. 2. 2016

U následujících dvou spekter opět poklesy otáčky na $387 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, je tedy patrné zmenšení amplitudy, avšak je viditelný zvyšující se šum v okolí dominantních špiček ložiska, které znamenají, že se ložisko pohybuje ve své zbytkové životnosti a je potřeba provést co nejdřív revizi.

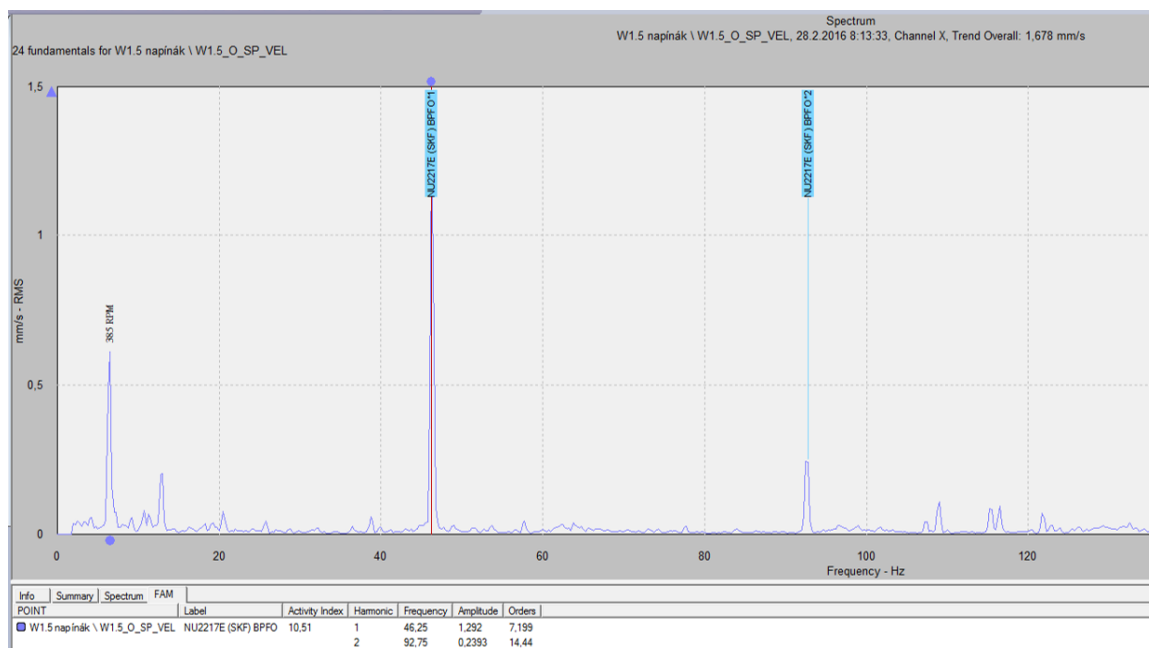


Obr. 3.15: Frekvenční spektrum obálky rychlosti, ve spektru jsou patrné výrazné špičky, dominantní je otáčková frekvence 24. 2. 2016



Obr. 3.16: Frekvenční spektrum obálky zrychlení s filtrem 3, ve spektru jsou patrné výrazné špičky harmonických násobků frekvence vnějšího kroužku ložiska 29. 2. 2016

Na těchto dvou posledních záznamech před výměnou jsou již velmi dobře patrné harmonické špičky, které se dokonale překrývají s frekvencemi vnějšího kroužku ložiska. Přestože hodnoty amplitud nebyly příliš vysoké, jednalo se o závažnou poruchu ložiska, která je zobrazena na obrázcích výše.



Obr. 3.17: Frekvenční spektrum obálky rychlosti s dominantní první harmonickou frekvencí vnějšího kroužku ložiska 28. 2. 2016

4. Vibrodiagnostická měření v závodu Smurfit Kappa Žimrovice s.r.o.

Vibrodiagnostická měření jsou prováděna Micrologem CMVA 60 (Obr. 4.1) většinou každý měsíc formou obchůzky. Měří se takto všechny sušící válce ze strany obsluhy, dále pak 4. a 5. sušící sekce ze strany pohonu a všechny pohony a převodové skříně. Snímače ze 4. a 5. sušící sekce jsou svedeny do rozvodové skříně mimo pracovní prostor papírenského stroje kvůli vysokým teplotám a špatné dostupnosti. Lze tedy takto snadno změřit vibrace, aniž by bylo nutno ručně přikládat snímač přímo k ložisku. Občas je vhodné zkontrolovat i sušící skupiny ze strany pohonu přímo na ložisku, protože se kvůli vysokým teplotám mohou poškodit snímače a kabeláž.



Obr. 4.1: Datakolektor SKF Microlog CMVA 60 [11]

U 1. až 3. sušící skupiny a mokré části papírenského stroje jsou data vyhodnocována pomocí online měření, které je možné kdykoliv zobrazit a zjistit tak změny v hodnotách vibrací. Hodnoty jsou sbírány do rozvodné skříně (Obr. 4.2) a z ní pak převáděny do počítačů. Rozvodné skříně jsou opatřeny i semaforem, který při hodnotě dosahující prvního alarmového stupně rozsvítí žlutý signál a při dosažení druhé úrovně alarmového stupně rozsvítí signál červený.



Obr. 4.2: Rozvodová skříň online měření [autor]

Měřicí místa na ložiscích sušících válců jsou opatřena přilepeným ocelovým kruhem pro lepší přenos vibrací. Obvykle jsou tato měřicí místa na opačné straně přívodu oleje (Obr. 4.3). Snímač je přichycován pomocí permanentního magnetu.



Obr. 4.3: Měřicí místo na sušícím válci ze strany obsluhy. Snímač se umísťuje horizontálně, na protější straně přívodu oleje [autor]

4.1 Technické údaje papírenského stroje v Smurfit Kappa Žimrovice s.r.o.

Pro tuto kapitolu byly informace čerpány dle literatury [14]

Papírenský stroj v závodu Smurfit Kappa Žimrovice s.r.o. byl rekonstruován, čímž se zvýšila konstrukční rychlost z dřívějších $320 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ na současných $460 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Díky vibrodiagnostickým měřením a sledování rezonančních frekvencí se dosahuje výrobních rychlostí až $480 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Jaké jsou základní parametry papírenského stroje po rekonstrukci, je uvedeno níže.

Výrobek:	glutiny, liner, dvouvrstvé kartony	
Plošná hmotnost:	$110 - 225 \text{ g} / \text{m}^2$	
Produkce stroje:	13 600 kg / hod na navíječi	
Šíře nátoky:	2700 mm	
Šíře papíru na navíječi:	2500 mm	
Rychlost stroje:	záťahová	– 15 m / min po dobu 30 min
	provozní min.	– 310 m / min
	provozní max.	– 430 m / min
	konstrukční	– 460 m / min
Klížení:	$3,9 \text{ g} / \text{m}^2$ na stranu při koncentraci 10 – 15 % a. s.	



Obr. 4.4: Papírenský stroj strana obsluhy – sušící sekce [autor]

5. Nastavování alarmových hodnot

Pro tuto kapitolu byly informace čerpány dle literatury [4]

Pomocí určení optimální alarmové hodnoty je možné včas určit, že poškozené ložisko, motor, nebo převodovka nenaplní požadovanou životnost a je potřeba co nejefektivněji naplánovat revizi, výměnu, nebo při vysokých hodnotách i zastavit činnost stroje.

Poplachové hodnoty mají většinou dvě úrovně. První úroveň je výstraha, která signalizuje nárůst hladiny vibrací oproti normální hodnotě. Je-li tento nárůst stálý, je potřeba zkontrolovat daný objekt a naplánovat požadovanou údržbu. Druhá úroveň znamená nebezpečí, a při tomto poplachu je nutné podniknout potřebné kroky k tomu, aby nedošlo k poškození stroje, nebo dokonce k havárii.

5.1 Obecné nastavení alarmů pro měření obálky signálu zrychlení

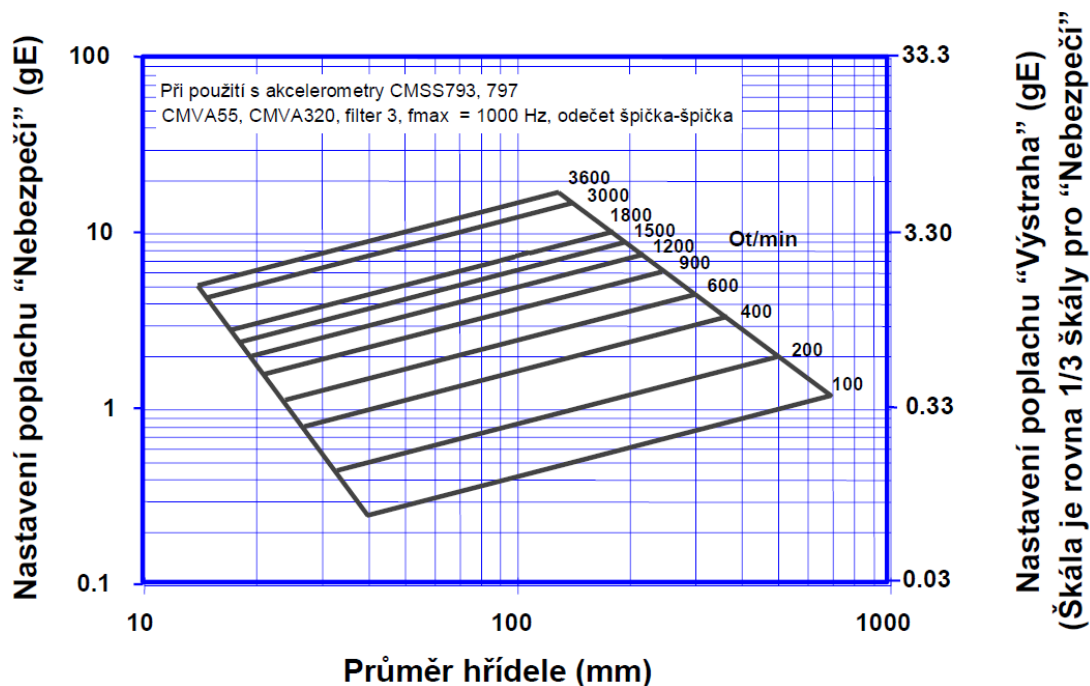
Pro tuto kapitolu byly informace čerpány dle literatury [4]

Prvním způsobem (ne však ideálním) jak určit alarmové hodnoty je obecná směrnice, která se často používá například u zcela nových strojů, či u strojů, u kterých nejsou změřeny odpovídající hodnoty vibrací. Tento způsob je dobrý jako prostředek pro výpočet potenciálních úrovní vibrací, které je možné očekávat při dalším vyhodnocování.

Aby bylo možné určit hodnotu alarmu na obálku zrychlení, je potřeba znát tyto základní parametry:

- Průměr vývrtu ložiska [mm] – indikátor zatížení.
- Otáčky hřídele [$\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$].

Jestliže je určen průměr vývrtu ložiska a otáčky hřídele, pak stačí odečíst z Obrázku 5.1 hodnoty pro úroveň alarmu (poplachu). Na pravé stupnici se takto stanoví úroveň alarmu pro výstrahu a na levé stupnici je možné zjistit hodnotu pro alarmovou úroveň nebezpečí.



Obr. 5.1: Alarmové směrnice pro obálku zrychlení [4]

Pro dosažení optimálního výsledku je důležité splnit určité předpoklady, protože odchylka od standardního sběru dat celkově ovlivní odečtené hodnoty. Mezi tyto předpoklady patří:

- ❖ Použití hardware SKF Microlog s filtrem obálky (500 Hz až 10 kHz).
- ❖ Použití filtru 3, pro pomaloběžné aplikace je však možné použít i filtr 2.
- ❖ Nastavení f_{\max} na 1 kHz.
- ❖ Použití snímače CMSS793, nebo CMSS797.
- ❖ Detekce špička – špička (peak – peak).

Obecnou podmínkou je také provádět měření na stroji, který pracuje za normálních podmínek, to je když se dosáhne provozní teploty a stroj pracuje za normálních jmenovitých podmínek. Dále je pak důležité určit místo měření tak, aby bylo v zóně maximálního zatížení, nebo v její blízkosti.

K přesnějšímu určení poplachových úrovní pro obálku zrychlení je také možné využít matematický model, který je vytvořen na základě zkušeností a je stanoven jako generický empirický vztah při použití hlavních parametrů. Je stanoven takto:

$$A = \left(\frac{f_{\max}}{1000} \right)^{a_1} \cdot a_2 \cdot n_p^{a_3} \cdot d^{a_4} \text{ [gE]} \quad (1.)$$

Kde:

a_1, a_2, a_3, a_4 empirické koeficienty, nutno určit statisticky z existující databáze.

Pro získání koeficientů a_1 až a_4 bylo zapotřebí provést sběr dat u rychloběžných a pomaloběžných strojů. Pro rychloběžné byla vybrána čerpadla a motory s otáčkami $3\,600\text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ a pro pomaloběžné pak válce papírenských strojů s otáčkami $400\text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$. Koincidenční úroveň takto naměřených dat byla mezi 80 a 90%. Byly takto určeny vzorce pro obě úrovně alarmu. Koeficient a_3 je roven 1 z důvodu toho, že vliv otáček na odečet obálky je zhruba lineární.

❖ Alarmová hodnota výstraha:

$$A_1 = \left(\frac{f_{\max}}{1000}\right)^{0,43} \cdot 3,26 \cdot 10^{-4} \cdot n_p \cdot d^{0,55} \text{ [gE]} \quad (2.)$$

❖ Alarmová hodnota nebezpečí:

$$A_2 = \left(\frac{f_{\max}}{1000}\right)^{0,43} \cdot 1,09 \cdot 10^{-4} \cdot n_p \cdot d^{0,55} \text{ [gE]} \quad (3.)$$

5.1.1 Přepočet alarmů pro jiné hodnoty maximální frekvence

Pro tuto kapitolu byly informace čerpány dle literatury [4]

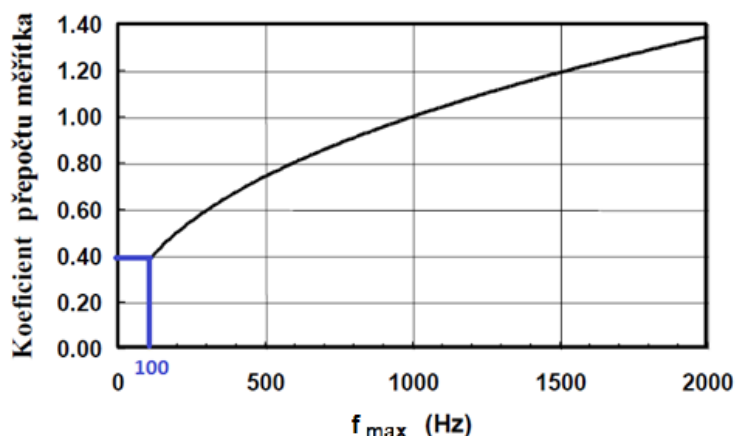
Jelikož je hodnota $f_{\max} = 500\text{ Hz}$ pro papírenské stroje do značné míry nevyhovující, je potřeba nalézt řešení pro získání co nejnižší f_{\max} . U pomaloběžných aplikací platí, že při delším sběru dat se f_{\max} snižuje a při kratším sběru dat se f_{\max} zvyšuje. Přesné nastavení této maximální frekvence má důležitý vliv na výsledek. Pro tento problém byla vyvinuta funkce měřítka, kterou popisuje následující rovnice:

$$A = A_{1000} \cdot \left(\frac{f_{\max}}{1000}\right)^{0,43} \text{ [gE]} \quad (4.)$$

Kde:

A_{1000} hodnota pro data, která byla zjištěna při $f_{\max} = 1000\text{ Hz}$

Tato funkce byla získána při laboratorních zkouškách na ložisku SKF 6207 a z tlakového válce papírenského stroje. Ze vzorce (4.) byla určena křivka pro odečet změny měřítka (Obr. 5.2), ze které je možno odečíst měřítko i pro minimální frekvenci 100 Hz, což se rovná přibližně 0,4.



Obr. 5.2: Funkce pro změnu měřítka maximální frekvence [4]

5.2 Nastavení alarmových hodnot s využitím statistických metod

Pro tuto kapitolu byly informace čerpány dle literatury [5]

Ustavení alarmů na základě statistických metod je nejpřesnější a nejspolehlivější řešení. Využívá se zde trendování měření vibrací v čase a určí se tak základní hodnoty. Postup vyhodnocení poplachových úrovní je v přehledu takový:

- Nasbírají se naměřená data, nejlépe v rozmezí několika let.
- Z množství dat se vynechají dřívější poplachové hodnoty a nulové hodnoty a vypočte se průměrná celková hodnota vibrací, buď v programu Excel pomocí funkce PRŮMĚR, nebo podle následujícího vzorce:

$$X_{ave} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad [-] \quad (2.)$$

- Vypočítá se směrodatná odchylka výběru. Nejjednodušší cestou pro výpočet je funkce STDEVA v programu Excel, ale obecně platí tento vzorec:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_{ave})^2}{n - 1}} \quad [-] \quad (3.)$$

- Z průměru a směrodatné odchylky výběru lze nyní vypočítat alarmové hodnoty. Většinou se vypočítávají dvě alarmové úrovně podle těchto vzorců:

- hodnota prvního alarmu výstraha:

$$A_1 = X_{ave} + 1,5 \cdot S \quad [-] \quad (4.)$$

- hodnota druhého alarmu nebezpečí:

$$A_2 = 1,5 \cdot A_1 \quad [-] \quad (5.)$$

6. Určení alarmových hodnot v závodu Smurfit Kappa Žimrovice s.r.o.

Nastavení alarmů se provádělo u cylindrů v sušící sekci, kde se nachází celkem 36 těchto válců. K dispozici byla periodická měření již od září roku 2010 a prováděla se dále pak každý následující měsíc formou obchůzky. Měření probíhala ze dvou stran na uložení válců v ložiscích a to tedy na straně pohonu – SP a na straně obsluhy – SO. Sušící sekce je pak dále rozdělena na jednotlivé skupiny; celkově jich je 5. V první až třetí skupině se nachází 8 válců, ve čtvrté skupině pouze válce 2 a v páté skupině je válců 10. V každé skupině se rychlost nepatrně liší, rozhodující je však rychlost na navíječi pope.

Některé měsíce nejsou ve statistice započítány, protože neproběhla v těchto měsících obchůzka z důvodu výměny snímačů, nebo přechodu na online systém u strany pohonu. Online systém je v současné době instalován na 1. až 3. sušící skupině ze strany pohonu kvůli nedostupnosti. S přechodem se začalo v září roku 2013 na první skupině, poté od března 2014 se přešlo i na druhou skupinu a od června 2015 je online monitorována i skupina třetí. Do statistiky tedy nejsou započítány tyto skupiny v daném období, ale v poměru k počtu dat toto nijak zvlášť neovlivní konečný výsledek.

Do statistiky také nebyly zahrnuty hodnoty dosahující poplachovou úroveň a hodnoty nulové, nebo se blížící nule. Liší se také měřené parametry za dané období. Od počátku měření, tedy od září 2010 až po únor 2012 se měřily pouze hodnoty zrychlení a obálky zrychlení. Poté se od srpna 2012 k získávaným hodnotám přidala rychlost, obálka zrychlení s filtrem 2, vysokofrekvenční detekce a špička vysokofrekvenční detekce, které slouží k vysokofrekvenčnímu měření vibrací v oblasti ultrazvuku. Dále pak byly snímány do prosince roku 2014 na straně pohonu hodnoty BIAS, které udávají správnost měření snímačů na základě elektronického testu, kdy se měří odchylka od běžného stavu. Ukázka výsledného měření za říjen 2012 je zobrazena v Tabulce 6.1 pro stranu pohonu a v Tabulce 6.2 pro stranu obsluhy. Rychlost na navíječi pope je zde $423,6 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.

Tab. 6.1: Hodnoty naměřených dat za říjen 2012 na straně pohonu [autor]

Sekce	Rychlost [m/min] SO/SP	Válec	Strana Pohonu (SP)						
			VEL [mms]	ACC [Gs]	EN2 [gE]	ENV [gE]	HFP	HFR	BIAS
1. sušící skupina	417,9 (1,48Hz)	SV 01	0,71	0,09	0,16	0,52	0,08	0,04	17,35
		SV 02	0,96	0,07	0,12	0,72	0,42	0,13	12,31
		SV 03	0,68	0,13	0,38	0,24	0,07	0,03	12,25
		SV 04	2,42	0,08	0,15	0,11	0,06	0,02	12,06
		SV 05	0,54	0,12	0,24	0,11	0,01	0,01	14,32
		SV 06	1,11	0,25	0,44	0,24	0,11	0,04	11,59
		SV 07	1,06	0,29	0,35	0,39	0,03	0,01	11,80
		SV 08	1,39	0,35	0,36	0,37	0,10	0,04	14,64
2. sušící skupina	417,3 (1,47Hz)	SV 09	0,79	0,19	0,45	0,13	0,07	0,03	11,41
		SV 10	0,59	0,10	0,11	0,11	0,07	0,03	12,31
		SV 11	0,46	0,10	0,15	0,11	0,08	0,03	11,73
		SV 12	0,90	0,18	0,27	0,23	0,12	0,04	11,14
		SV 13	0,97	0,22	0,72	0,43	0,12	0,03	11,96
		SV 14	1,35	0,40	0,71	0,99	0,07	0,03	11,79
		SV 15	0,54	0,19	0,22	0,21	0,06	0,02	6,68
		SV 16	0,75	0,20	0,25	0,23	0,05	0,02	10,91
3. sušící skupina	418,3 (1,47Hz)	SV 17	1,73	0,12	0,19	0,16	0,08	0,03	16,16
		SV 18	2,68	0,11	0,18	0,11	0,04	0,12	17,38
		SV 19	0,71	0,11	0,18	0,85	0,41	0,17	11,34
		SV 20	4,44	0,19	0,20	0,63	0,21	0,06	12,17
		SV 21	0,63	0,17	0,39	1,90	0,14	0,06	11,01
		SV 22	0,81	0,11	0,12	0,17	0,15	0,08	9,96
		SV 23	0,73	0,12	0,16	0,78	0,16	0,06	11,52
		SV 24	102,91	0,64	1,10	0,10	0,01	0,01	2,69
4. sušící skupina	422,3 (1,49Hz)	SV 25	0,33	0,08	0,19	0,15	0,07	0,03	12,35
		SV 26	0,49	0,10	0,17	0,11	0,09	0,03	11,89
5. sušící skupina	421,1 (1,49Hz)	SV 27	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02
		SV 28	0,85	0,14	0,20	0,13	0,07	0,03	11,81
		SV 29	0,50	0,07	0,12	0,07	0,09	0,03	6,72
		SV 30	1,00	0,20	0,30	0,76	0,07	0,03	11,68
		SV 31	0,33	0,07	0,11	0,12	0,07	0,02	10,51
		SV 32	1,31	0,08	0,12	0,38	0,07	0,03	11,37
		SV 33	0,43	0,06	0,17	0,98	0,06	0,02	11,42
		SV 34	0,51	0,07	0,08	0,05	0,08	0,03	4,04
		SV 35	0,56	0,12	0,20	0,21	0,01	0,01	2,48
		SV 36	1,38	0,20	0,24	0,23	0,09	0,03	11,94

Tab. 6.2: Hodnoty naměřených dat za říjen 2012 na straně obsluhy [autor]

Sekce	Rychlost [m/min] SO/SP	Válec	Strana Obsluhy (SO)					
			VEL [mms]	ACC [Gs]	EN2 [gE]	ENV [gE]	HFP	HFR
1. sušící skupina	417,9 (1,48Hz)	SV 01	0,68	0,48	0,39	1,25	0,14	0,05
		SV 02	1,06	0,30	0,24	0,51	0,07	0,03
		SV 03	0,54	0,27	0,32	0,37	0,06	0,03
		SV 04	0,80	0,26	0,30	0,35	0,05	0,02
		SV 05	0,77	0,27	0,27	0,34	0,08	0,03
		SV 06	0,77	0,19	0,23	0,17	0,05	0,02
		SV 07	0,56	0,43	0,53	0,49	0,09	0,04
		SV 08	0,72	0,33	0,64	0,46	0,09	0,04
2. sušící skupina	417,3 (1,47Hz)	SV 09	1,12	0,32	0,37	0,36	0,10	0,04
		SV 10	0,70	0,26	0,65	0,38	0,04	0,02
		SV 11	0,42	0,22	0,24	0,32	0,05	0,02
		SV 12	0,71	0,30	0,41	0,35	0,07	0,03
		SV 13	0,67	0,21	0,35	0,17	0,05	0,02
		SV 14	1,24	0,30	0,47	0,50	0,05	0,02
		SV 15	0,60	0,24	0,28	0,24	0,05	0,02
		SV 16	1,22	0,30	0,62	0,32	0,05	0,02
3. sušící skupina	418,3 (1,47Hz)	SV 17	3,66	0,58	0,41	2,02	0,68	0,16
		SV 18	1,02	0,21	0,28	0,21	0,05	0,02
		SV 19	0,71	0,18	0,33	0,23	0,04	0,02
		SV 20	0,76	0,33	0,41	0,55	0,06	0,02
		SV 21	0,58	0,17	0,29	0,18	0,03	0,01
		SV 22	0,74	0,16	0,20	0,23	0,03	0,01
		SV 23	0,53	0,22	0,40	0,40	0,04	0,01
		SV 24	0,78	0,22	0,40	0,37	0,05	0,02
4. sušící skupina	422,3 (1,49Hz)	SV 25	0,65	0,23	0,42	0,27	0,03	0,02
		SV 26	1,56	0,26	0,50	0,27	0,04	0,02
5. sušící skupina	421,1 (1,49Hz)	SV 27	0,56	0,30	0,29	0,42	0,08	0,03
		SV 28	0,85	0,27	0,33	0,39	0,05	0,02
		SV 29	0,70	0,23	0,23	0,35	0,07	0,03
		SV 30	0,66	0,20	0,15	0,34	0,05	0,02
		SV 31	0,36	0,27	0,13	0,61	0,10	0,04
		SV 32	0,81	0,11	0,17	0,14	0,05	0,02
		SV 33	0,42	0,10	0,24	0,15	0,03	0,01
		SV 34	0,75	0,18	0,29	0,22	0,03	0,01
		SV 35	0,33	0,22	0,42	0,30	0,01	0,00
		SV 36	0,84	0,20	0,23	0,19	0,04	0,02

Do statistických výpočtů nebyly zahrnuty nulové hodnoty – šedé pole, hodnoty první úrovně poplachu – žluté pole a hodnoty druhé úrovně poplachu – červené pole. Celkem takto byly nasbírány a vyhodnoceny data z 51 měsíců.

6.1 Určení celkových alarmových hodnot

Prvním krokem bylo tedy vypočítání průměrných hodnot a vypočtení směrodatné odchylky výběru. Následně se z těchto hodnot vypočítaly hladiny alarmů podle výše uvedených vzorců v kapitole 5.2. Průměry, odchylky a alarmy byly určeny nejdříve pro stranu pohonu (Tab. 6.3) a pro stranu obsluhy (Tab. 6.4) zvlášť kvůli porovnání. Následně byly tyto data sjednoceny pro implementaci do pracovních podmínek (Tab. 6.5).

Tab. 6.3: Alarmové hodnoty pro stranu pohonu [autor]

Hodnoty	Strana Pohonu (SP)						
	VEL [mms]	ACC [Gs]	EN2 [gE]	ENV [gE]	HFP	HFR	BIAS
Průměr	0,812	0,131	0,214	0,224	0,091	0,031	11,316
Směrodatná odchylka	0,455651	0,087749	0,158573	0,198856	0,076817	0,023956	1,227928
ALARM 1	1,50	0,26	0,45	0,52	0,21	0,07	13,16
ALARM 2	2,24	0,39	0,68	0,78	0,31	0,10	19,74

Tab. 6.4: Alarmové hodnoty pro stranu obsluhy [autor]

Hodnoty	Strana Obsluhy (SO)					
	VEL [mms]	ACC [Gs]	EN2 [gE]	ENV [gE]	HFP	HFR
Průměr	0,716	0,202	0,269	0,286	0,040	0,017
Směrodatná odchylka	0,348873	0,103570	0,146910	0,187943	0,032304	0,012866
ALARM 1	1,24	0,36	0,49	0,57	0,09	0,04
ALARM 2	1,86	0,54	0,73	0,85	0,13	0,05

Tab. 6.5: Celkové alarmové hodnoty pro stranu pohonu a obsluhy [autor]

Hodnoty	Strana Pohonu a Obsluhy					
	VEL [mms]	ACC [Gs]	EN2 [gE]	ENV [gE]	HFP	HFR
Průměr	0,764	0,167	0,242	0,255	0,065	0,024
Směrodatná odchylka	0,391256	0,125931	0,154299	0,195077	0,059184	0,019219
ALARM 1	1,35	0,36	0,47	0,55	0,15	0,05
ALARM 2	2,03	0,53	0,71	0,82	0,23	0,08

Při porovnání strany pohonu a obsluhy je patrné, že až na hodnotu zrychlení a obálky jsou větší hodnoty ze strany pohonu. Většinou lze předpokládat vyšší úrovně vibrací ze strany pohonu kvůli přenosu chvění z motorů a převodovek. Celkové hodnoty vibrací pak vykreslují přibližně střední hodnotu mezi úrovněmi alarmů strany pohonu a obsluhy.

6.2 Závislost hladiny vibrací na rychlosti stroje

Vzhledem na velké množství nashromážděných dat se nabízí jedinečná příležitost zjistit závislost naměřených dat na pracovní rychlosti stroje. Rozsah rychlostí se totiž u výroby papíru často mění a dosahuje rozpětí v konkrétním případě od $272,14 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ až po hodnotu $454,73 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.

S vyšší rychlostí samozřejmě roste produkce vyráběného papíru, hrozí zde ale riziko dosažení některých z rezonančních úrovní, například rámu stroje, ložiska, nebo válce. Se vzrůstající rychlostí je také potřebná vyšší teplota v sušící sekci, což zejména znesnadňuje pochůzkové měření vibrací.

Jaká je ale závislost úrovně vibrací na rychlosti stroje, to už ukazují následující tabulky. Hodnoty byly opět nejdříve rozděleny na stranu pohonu (Tab. 6.6) a stranu obsluhy (Tab. 6.7). Pro lepší znázornění byly rychlosti stroje rozděleny do čtyř skupin s ohledem na rozsah rychlostí a počet hodnot v nich obsažených. Do každé z těchto skupin se pak vypočítala průměrná hodnota dané měřené veličiny z příslušného měsíce. K této závislosti nebyla přidána hodnota BIAS, protože její hodnota nemá na rychlost žádný vliv.

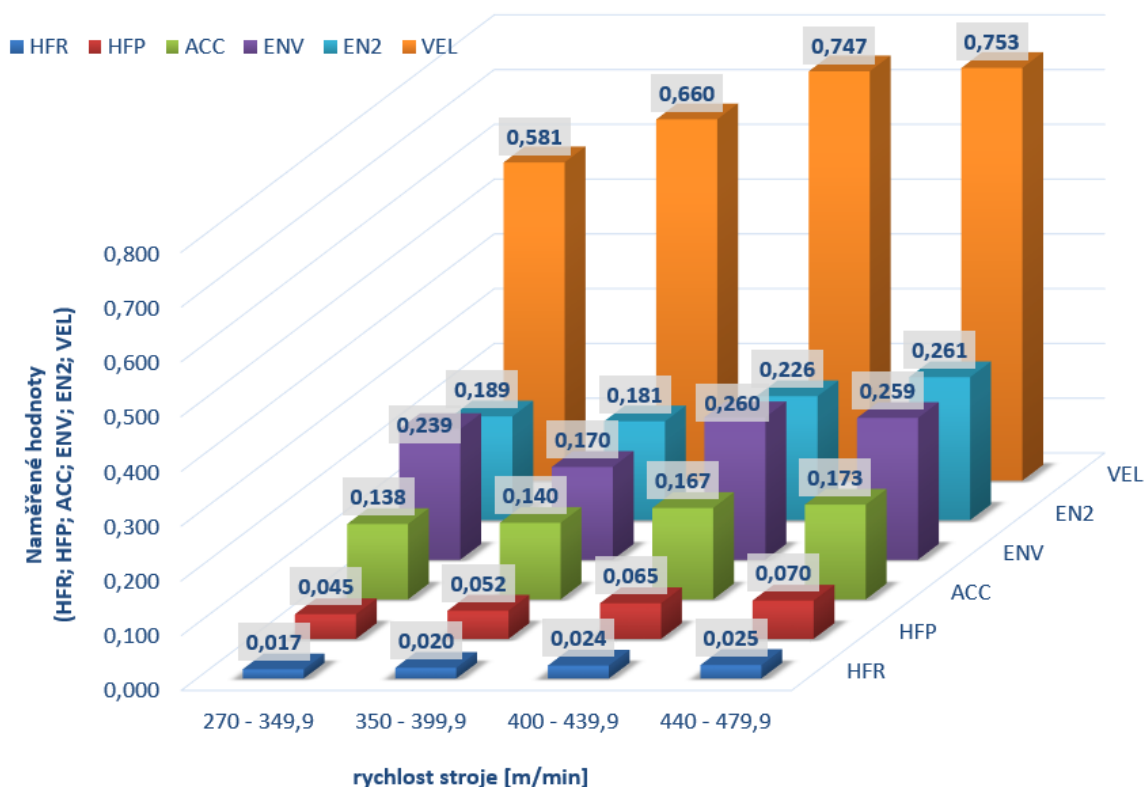
Tab. 6.6: Závislost úrovně vibrací na rychlosti pro stranu pohonu [autor]

Skupiny [m·min ⁻¹]	Strana Pohonu (SP)					
	VEL [mms]	ACC [Gs]	EN2 [gE]	ENV [gE]	HFP	HFR
270 – 349,9	0,660	0,103	0,178	0,219	0,066	0,022
350 – 399,9	0,739	0,140	0,157	0,182	0,080	0,029
400 – 439,9	0,783	0,130	0,193	0,227	0,085	0,029
440 – 479,9	0,778	0,136	0,243	0,219	0,096	0,031

Tab. 6.7: Závislost úrovně vibrací na rychlosti pro stranu obsluhy [autor]

Skupiny [m·min ⁻¹]	Strana Obsluhy (SO)					
	VEL [mms]	ACC [Gs]	EN2 [gE]	ENV [gE]	HFP	HFR
270 – 349,9	0,502	0,172	0,201	0,261	0,024	0,011
350 – 399,9	0,580	0,154	0,204	0,181	0,024	0,010
400 – 439,9	0,712	0,204	0,259	0,294	0,045	0,018
440 – 479,9	0,729	0,210	0,280	0,299	0,044	0,018

Výsledná závislost vibrací na rychlosti byla pro lepší názornost zakreslena do prostorového sloupcového grafu. Je zde dobře patrný nárůst vibrací se vzrůstající rychlostí. U většiny z měřených veličin je tento nárůst poměrně lineární, u některých jsou patrné různé výchyly. Za hodnoty s téměř lineárním růstem lze považovat HFR, HFP, ACC a VEL. U veličiny EN2 je patrný pokles u druhé skupiny 350 – 399,9 m · min⁻¹, ale pak už se jeví tento nárůst opět se zvyšující se tendencí. U veličiny ENV je tento pokles u druhé skupiny ještě razantnější.



Graf 6.1: Závislost úrovně vibrací na rychlosti stroje. Hodnoty jsou rozděleny do čtyřech skupin [autor]

6.3 Určení alarmových hodnot podle rychlosti stroje

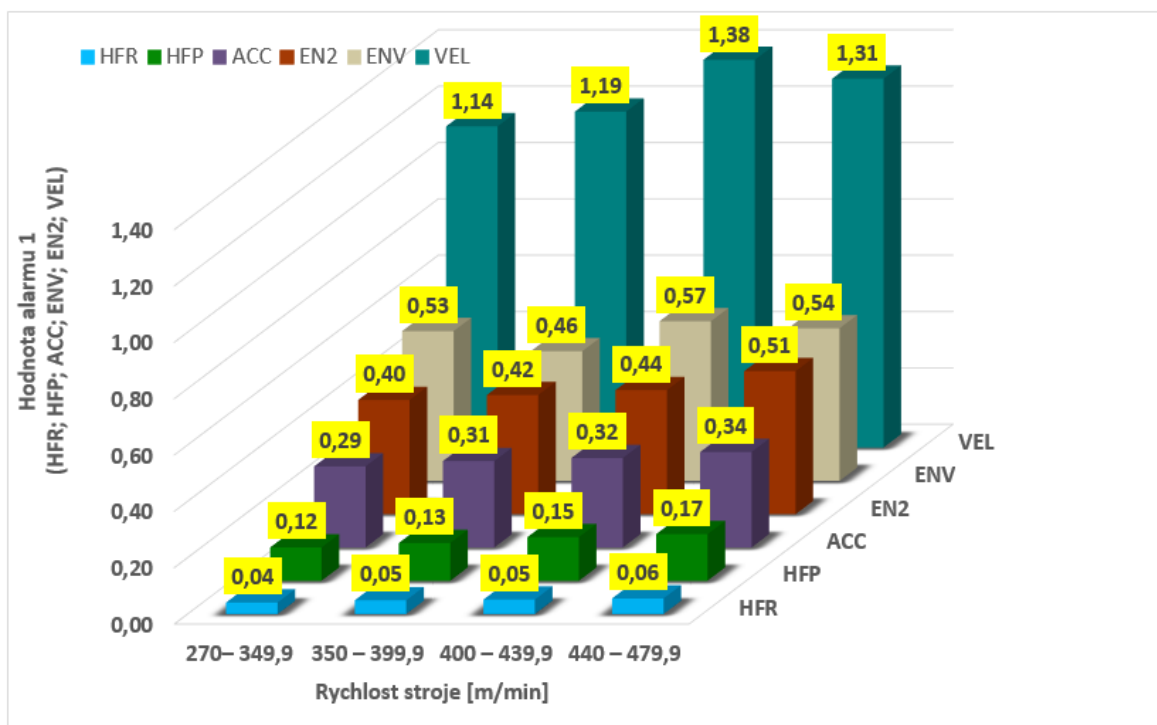
Díky patrně rostoucí úrovni vibrací na rychlosti stroje byly přepočteny i hodnoty alarmových mezí. Rozdělení bylo provedeno opět do čtyř stejných skupin v rozmezí od 270 do 479,9 $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$. Alarmové hodnoty byly pak vypočteny z příslušných měřiců při dané rychlosti stroje. Nejdříve byly vypočteny hodnoty alarmů pro stranu pohonu (Tab. 6.8) a pro stranu obsluhy (Tab. 6.9) a poté se alarmové hodnoty vypočítaly i pro stranu pohonu a obsluhy současně (Graf 6.2 a 6.3).

Tab. 6.8: Alarmové hodnoty pro stranu pohonu [autor]

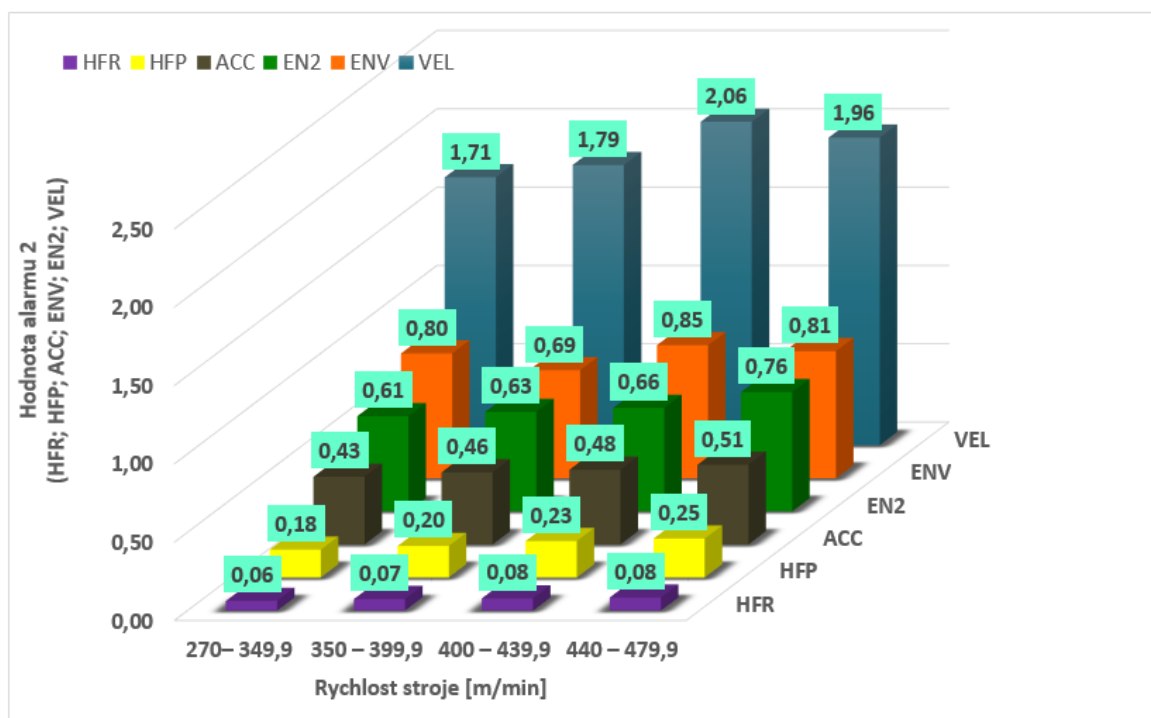
	Skupiny [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]	strana pohonu (SP)					
		VEL [mms]	ACC [Gs]	EN2 [gE]	ENV [gE]	HFP	HFR
ALARM 1	270 – 349,9	1,42	0,22	0,41	0,54	0,16	0,06
	350 – 399,9	1,36	0,29	0,40	0,43	0,20	0,07
	400 – 439,9	1,48	0,25	0,39	0,54	0,20	0,06
	440 – 479,9	1,42	0,28	0,53	0,49	0,22	0,07
ALARM 2	270 – 349,9	2,13	0,32	0,61	0,81	0,25	0,08
	350 – 399,9	2,04	0,43	0,60	0,64	0,30	0,11
	400 – 439,9	2,22	0,38	0,58	0,81	0,30	0,09
	440 – 479,9	2,12	0,42	0,79	0,74	0,33	0,10

Tab. 6.9: Alarmové hodnoty pro stranu obsluhy [autor]

	Skupiny [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]	strana obsluhy (SO)					
		VEL [mms]	ACC [Gs]	EN2 [gE]	ENV [gE]	HFP	HFR
ALARM 1	270 – 349,9	0,88	0,33	0,40	0,52	0,05	0,02
	350 – 399,9	1,08	0,32	0,44	0,49	0,05	0,02
	400 – 439,9	1,28	0,35	0,47	0,59	0,09	0,04
	440 – 479,9	1,25	0,37	0,50	0,57	0,10	0,04
ALARM 2	270 – 349,9	1,33	0,49	0,60	0,78	0,08	0,03
	350 – 399,9	1,62	0,48	0,66	0,73	0,07	0,03
	400 – 439,9	1,92	0,53	0,71	0,88	0,14	0,06
	440 – 479,9	1,88	0,55	0,75	0,86	0,15	0,06



Graf 6.2: Hodnoty prvních alarmů v závislosti na rychlosti stroje. [autor]



Graf 6.3: Hodnoty druhých alarmů v závislosti na rychlosti stroje. [autor]

Nastavení alarmových hodnot podle výrobní rychlosti stroje ukázalo také převážně rostoucí tendenci, až na hodnotu VEL, kde je mírný pokles vibrací u poslední skupiny a u ENV, kde není zdá se žádná závislost rychlosti na alarmu.

7. Rozdílnosti pomaloběžných a rychloběžných papírenských strojů

Jelikož byla prokázána jistá závislost úrovně vibrací na výrobní rychlosti pomaloběžného papírenského stroje, nabízí se otázka, zdali tato závislost platí u rychloběžných papírenských strojů a o kolik se dané hodnoty liší v porovnání s pomaloběžnými stroji.

K porovnání pro pomaloběžné papírenské stroje posloužily data ze závodu Smurfit Kappa Žimrovice s.r.o., kde výrobní rychlosti dosahují zhruba od 270 do 480 m · min⁻¹ a pro rychloběžné papírenské stroje pak data z nejmenované firmy, kde se výrobní rychlost pohybuje od 550 do 900 m · min⁻¹.

7.1 Vyhodnocení dat z rychloběžných papírenských strojů

Pro tuto kapitolu byla data čerpána z firmy, která si nepřeje být zveřejněna.

Aby bylo možné provést srovnání s pomaloběžnými papírenskými stroji, bylo potřeba rozdělit dané rychlosti do skupin a poté vypočítat stejným způsobem průměry, směrodatné odchylky a hodnoty alarmů pro strany pohonu a obsluhy zvlášť a poté pro strany pohonu obsluhy dohromady.

K tomuto účelu byly k dispozici data z jednoho sušícího válce, který byl měřen periodicky třikrát denně v období od 11. 01. 2016 až do 14. 03. 2016. Pro výpočet byly naměřené hodnoty rozděleny opět do čtyř skupin a nebyly započítány hodnoty alarmů a hodnoty blíží se k nule. Takto měřeny byly tři veličiny, a to:

- hodnota zrychlení – ACC [Gs]
- hodnota rychlosti – VEL [mm · s⁻¹]
- hodnota obálky s filtrem 3 – EN3 [gE]

Nejdříve byly pro čtyři skupiny vypočteny hodnoty průměru pro stranu pohonu a obsluhy (Tab. 7.1), poté byla vypočtena směrodatná odchylka výběru pro stranu pohonu a obsluhy (Tab. 7.2) a nakonec celkové hodnoty ze strany pohonu a obsluhy současně (Tab. 7.3).

Tab. 7.1: Hodnoty průměru pro stranu pohonu a obsluhy

Skupiny [m·min ⁻¹]	Průměr - Strana Pohonu (SP)			Průměr - Strana Obsluhy (SO)		
	ACC [Gs]	VEL [mms]	EN3 [gE]	ACC [Gs]	VEL [mms]	EN3 [gE]
550 – 649,9	0,192	0,538	0,109	0,140	0,529	0,079
650 – 749,9	0,324	0,856	0,176	0,204	1,080	0,124
750 – 819,9	0,362	0,950	0,184	0,247	1,299	0,247
820 – 899,9	0,365	1,018	0,226	0,218	1,596	0,142

Tab. 7.2: Hodnoty směrodatné odchylky pro stranu pohonu a obsluhy

Skupiny [m·min ⁻¹]	Směrodatná odchylka - Strana Pohonu (SP)			Směrodatná odchylka - Strana Obsluhy (SO)		
	ACC [Gs]	VEL [mms]	EN3 [gE]	ACC [Gs]	VEL [mms]	EN3 [gE]
550 – 649,9	0,0648	0,1067	0,0901	0,0355	0,1472	0,0386
650 – 749,9	0,0697	0,1590	0,2112	0,0420	0,3106	0,0735
750 – 819,9	0,0446	0,1306	0,0577	0,0378	0,2714	0,3996
820 – 899,9	0,0544	0,1203	0,0755	0,0391	0,2752	0,0456

Tab. 7.3: Celkové hodnoty průměru a směrodatné odchylky

Skupiny [m·min ⁻¹]	Průměr			Směrodatná odchylka		
	ACC [Gs]	VEL [mms]	EN3 [gE]	ACC [Gs]	VEL [mms]	EN3 [gE]
550 – 649,9	0,166	0,533	0,094	0,0580	0,1274	0,0703
650 – 749,9	0,264	0,968	0,150	0,0834	0,2703	0,1605
750 – 819,9	0,305	1,124	0,215	0,0708	0,2750	0,2850
820 – 899,9	0,292	1,307	0,184	0,0846	0,3593	0,0750

U vypočtených hodnot je možné pozorovat, že vyšších čísel dosahují hodnoty ze strany pohonu. Nejspíše je to způsobeno přenosem vibrací od elektrického motoru, který je umístěn přímo u ložiska, bez převodovky či kardanové hřídele. U celkových hodnot je pak vidět, že dosahují vyšších hranic, než tomu bylo u pomaloběžných papírenských strojů.

Následně byly vypočteny první alarmy pro stranu pohonu a obsluhy (Tab. 7.4), pak druhé alarmy pro stranu pohonu a obsluhy (Tab. 7.5) a celkové alarmové meze (Tab. 7.6).

Tab. 7.4: První úroveň alarmu pro stranu pohonu a obsluhy

Skupiny [m·min ⁻¹]	ALARM 1 - strana pohonu (SP)			ALARM 1 - strana obsluhy (SO)		
	ACC [Gs]	VEL [mms]	EN3 [gE]	ACC [Gs]	VEL [mms]	EN3 [gE]
550 – 649,9	0,19	0,75	0,14	0,29	0,70	0,24
650 – 749,9	0,27	1,55	0,23	0,43	1,09	0,49
750 – 819,9	0,30	1,71	0,85	0,43	1,15	0,27
820 – 899,9	0,28	2,01	0,21	0,45	1,20	0,34

Tab. 7.5: Druhá úroveň alarmu pro stranu pohonu a obsluhy

Skupiny [m·min ⁻¹]	ALARM 2 - strana pohonu (SP)			ALARM 2 - strana obsluhy (SO)		
	ACC [Gs]	ACC [Gs]	VEL [mms]	EN3 [gE]	VEL [mms]	EN3 [gE]
550 – 649,9	0,43	0,29	1,13	0,21	1,05	0,37
650 – 749,9	0,64	0,40	2,32	0,35	1,64	0,74
750 – 819,9	0,64	0,46	2,56	1,27	1,72	0,41
820 – 899,9	0,67	0,41	3,01	0,32	1,80	0,51

Tab. 7.6: První a druhá úroveň alarmu

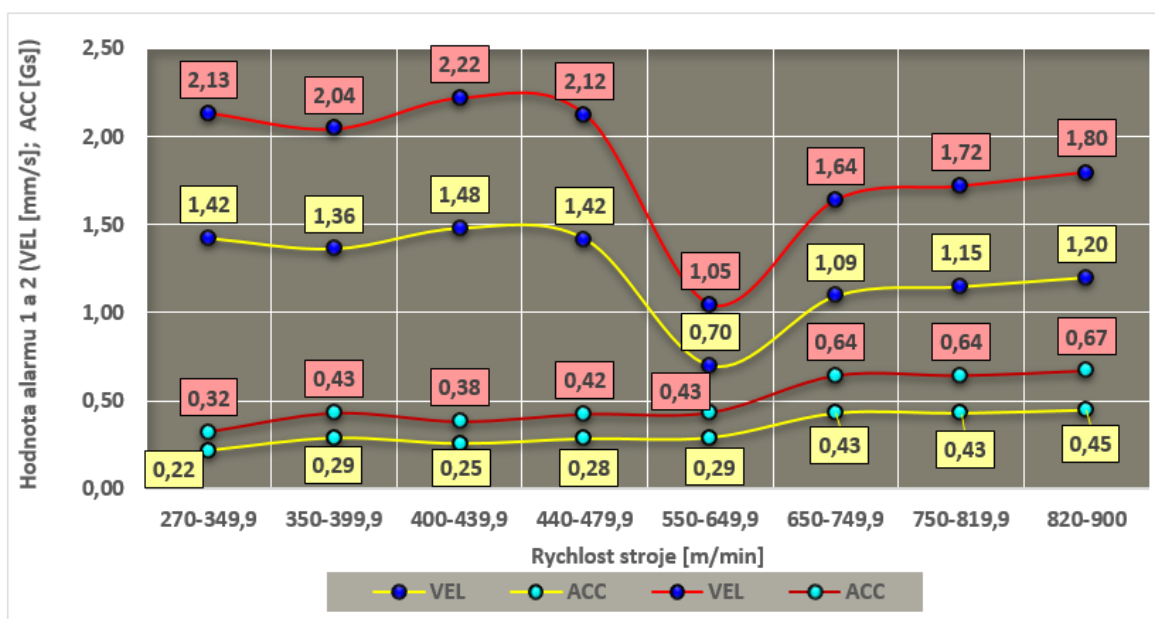
Skupiny [m·min ⁻¹]	ALARM 1			ALARM 2		
	ACC [Gs]	VEL [mms]	EN3 [gE]	ACC [Gs]	VEL [mms]	EN3 [gE]
550 – 649,9	0,25	0,72	0,20	0,38	1,09	0,30
650 – 749,9	0,39	1,37	0,39	0,58	2,06	0,59
750 – 819,9	0,41	1,54	0,64	0,62	2,31	0,96
820 – 899,9	0,42	1,85	0,30	0,63	2,77	0,45

U celkových alarmových mezí lze jasně vypořádat, že hodnoty zrychlení a rychlosti jsou závislé na rychlosti stroje. To samé ale nelze říci o obálce s filtrem 3, která nevykazuje takovou závislost jako v případě zrychlení a rychlosti. Její největší hodnota 0,96 gE je dosažena v třetí skupině rychlostí 750-820 m·min⁻¹, ale v poslední skupině rychlostí

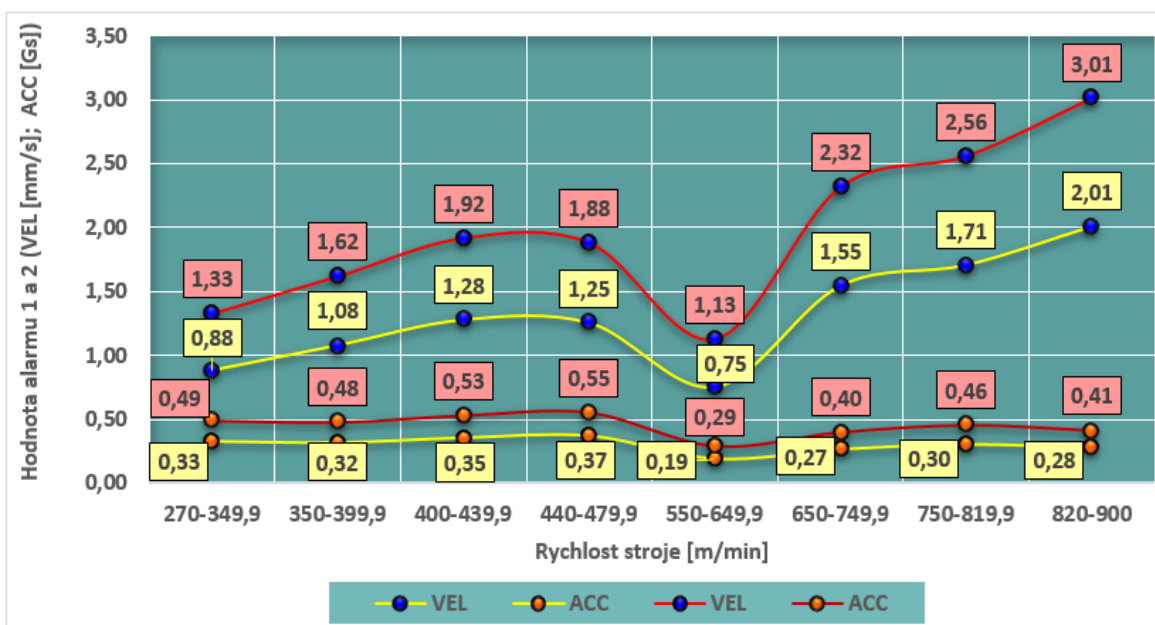
820-900 m·min⁻¹, kde by se očekával nárůst, klesne tato hodnota víc jak na polovinu, dokonce méně, než je ve druhé rychlostní skupině 650-750 m·min⁻¹.

7.2 Porovnání pomaloběžných a rychloběžných papírenských strojů

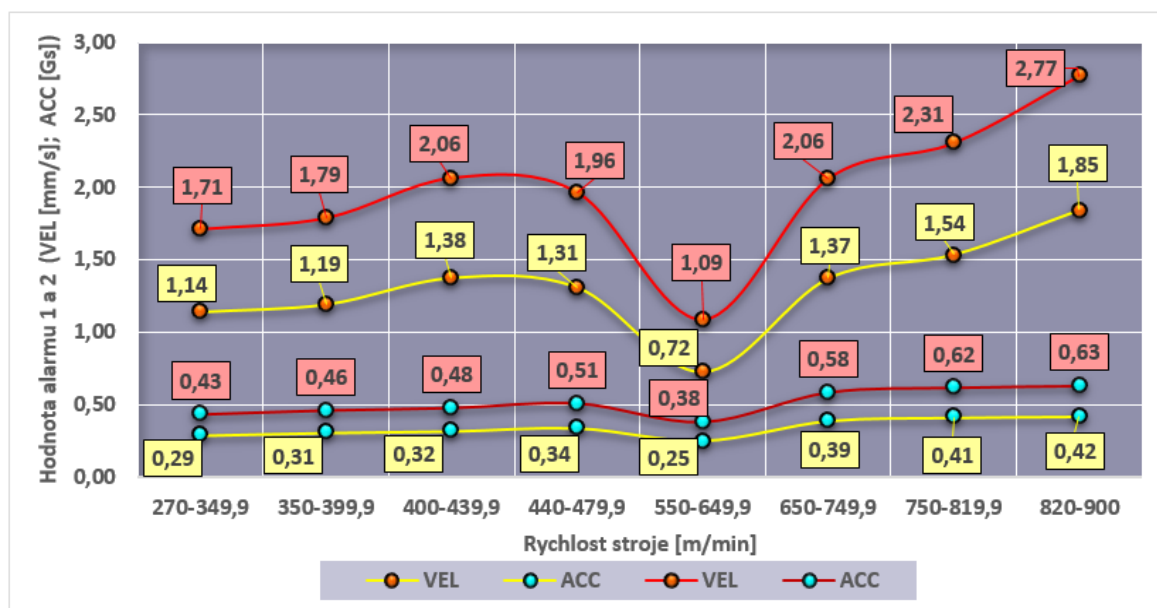
Pro srovnání byly vzaty všechny alarmové hodnoty z pomaloběžných a rychloběžných papírenských strojů, který jsou v této práci vypočteny a byly vytvořeny grafy závislosti alarmů na straně obsluhy, na straně pohonu a poté celkové hodnoty alarmů.



Graf 7.1: Celkové úrovně alarmů pro papírenské stroje ze strany pohonu [autor]



Graf 7.2: Celkové úrovně alarmů pro papírenské stroje ze strany obsluhy [autor]



Graf 7.3: Celkové úrovně alarmů pro papírenské stroje [autor]

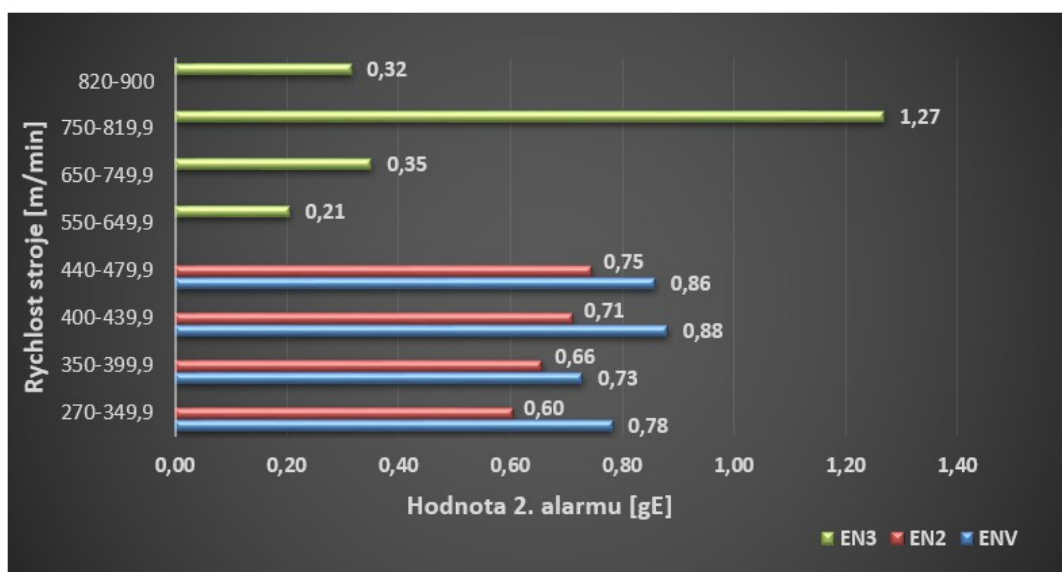
Celkem patrný propad v grafu je mezi rychlostmi 479,9 až 555 $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$, což je způsobeno přechodem z pomaloběžného na rychloběžný stroj. Zdůvodnit to lze tím, že papírenské stroje jsou konstruovány pro určité výrobní rychlosti. U nejnižší výrobní rychlosti lze proto očekávat, že vibrace budou na nízké úrovni. Důležitým faktorem je také stav stroje a použitá ložiska. Je ovšem zajímavé, že ve výsledných alarmech jsou hodnoty u pomaloběžných papírenských strojů na vyšší úrovni, než je tomu u rychloběžných strojů na nejnižší úrovni. Rozdíl je přitom okolo 300 $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$.

Velmi zajímavé je také srovnání alarmových hodnot ze strany pohonu a obsluhy. U strany pohonu pomaloběžných strojů jsou patrné vyšší hodnoty, než je tomu u strojů rychloběžných. To může být způsobené tím, že u pomaloběžných strojů jsou používány motory, převodovky a kardany, kdežto u rychloběžných v konkrétním případě jsou motory naistalovány na každý válec zvlášť. Vibrace také vykazují spíše setrvalý stav, než nějaké exponenciální navyšování. U strany obsluhy je patrný větší nárůst hodnot vibrací se zvyšující se výrobní rychlostí stroje. Hodnoty zrychlení sice takový nárůst nevykazují, ovšem u hodnot rychlosti je tento nárůst velmi dobře patrný.

Lze tedy říci, že porovnání pomaloběžných a rychloběžných strojů přineslo jisté závislosti, které se mohou v praxi velmi dobře využít při nastavování alarmových hodnot. V optimálním případě je ale důležité, aby daný papírenský stroj byl sledován a byla pro něj vytvořena vlastní charakteristika závislosti alarmových hodnot na rychlosti stroje.

7.2.1 Porovnání obálek zrychlení

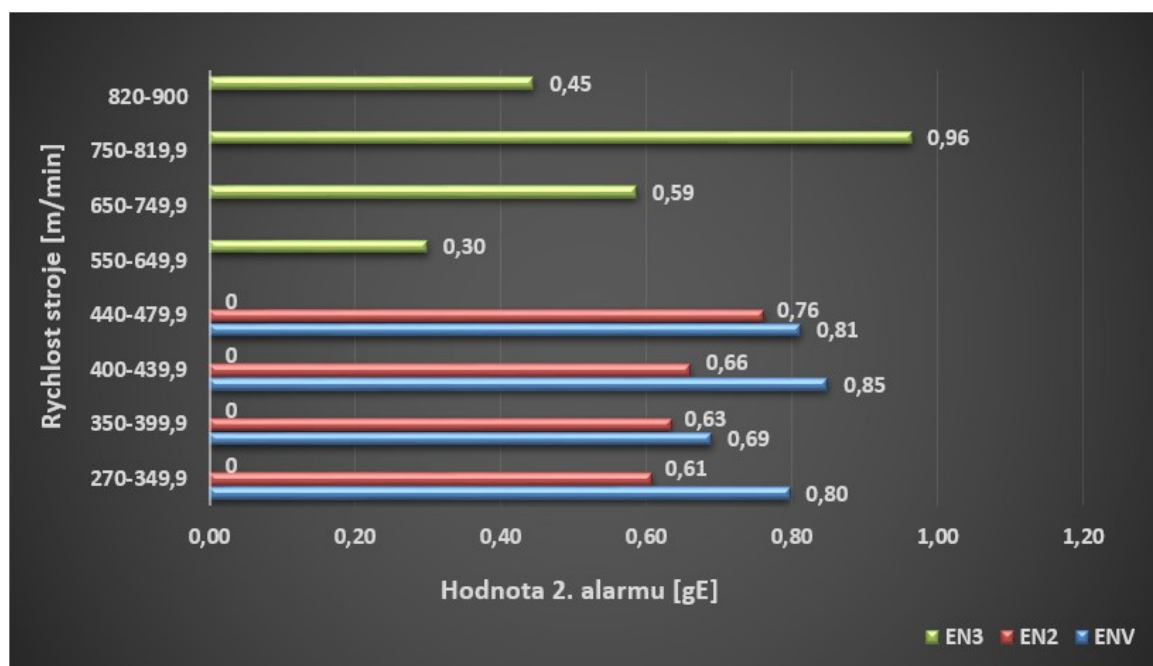
Jelikož je při vibrodiagnostice papírenských strojů velmi důležitá obálka zrychlení, bylo provedeno srovnání obálek z pomaloběžných strojů, kde byly měřeny následující; obálka zrychlení a obálka zrychlení s filtrem 2 a u rychloběžných papírenských strojů, kde byla měřena obálka s filtrem 3. Pro tento účel srovnání byly vzaty hodnoty 2 alarmů. Výsledky se opět rozdělily na stranu obsluhy (Graf 7.4), stranu pohonu (Graf 7.5) a stranu pohonu a obsluhy dohromady (Graf 7.6)



Graf 7.4: Srovnání obálek zrychlení, strana obsluhy [autor]



Graf 7.5: Srovnání obálek zrychlení, strana pohonu [autor]



Graf 7.6: Srovnání obálek zrychlení, strana obsluhy i pohonu [autor]

U výsledných grafů je patrné, že obálky zrychlení nejsou přímo úměrné výrobní rychlosti papírenského stroje. Souvislou stoupající tendenci má pouze obálka zrychlení s filtrem 2 u strany obsluhy, což se i projevilo ve srovnání této obálky ze strany obsluhy a pohonu dohromady. Největší odchylky vykazuje obálka zrychlení s filtrem 3.

8. Závěr

V této diplomové práci jsem se zabýval vibrodiagnostickými metodami pro aplikaci na papírenské stroje. Vibrace jsou na ložiscích papírenský válců obtížně měřitelná hlavně kvůli nízkým otáčkám. Dosahuje se tedy malých naměřených hodnot, proto je detekce závad v počáteční fázi poněkud složitější, než je tomu u strojů s vyššími otáčkami.

Popsal jsem a vyobrazil poškozená ložiska rychloběžných a pomaloběžných papírenských strojů, které byly sledovány již od prvotního poškození až do koncového stádia životnosti, kdy následovala jejich výměna. Poruchy ložisek jsou takto vyobrazena většinou formou spekter, ale i trendů a časových záznamů.

Dále jsem uvedl příklady výpočtu alarmových mezí, které slouží pro bezpečný provoz a včasné naplánování odstávky. Jsou takto popsány metody pro nové, ale i zaběhnuté stroje. Tyto alarmové meze jsem vypočítal pro závod Smurfit Kappa Žimrovice s.r.o. s využitím statistických metod, kde jsem nejdříve určil průměr a směrodatnou odchylku výběru a následně vypočítal alarmové meze z daných vzorců pro stranu obsluhy, pohonu a pro stranu pohonu a obsluhy dohromady. Celkem jsem takto vyhodnotil data z měsíčních periodických měření za uplynulých 5 let.

Protože bylo k dispozici velké množství dat s různými pracovními rychlostmi, vypočítal jsem a rozdělil do čtyřech skupin alarmové meze v závislosti na rychlosti stroje. Tyto alarmové meze je pak vhodné přizpůsobit pro aktuální rychlosti, takže jsou lepším ukazatelem poškození, než by tomu bylo u celkových alarmových hodnot.

Nakonec jsem vyhodnotil data z jednoho sušícího válce rychloběžného papírenského stroje, vypočítal alarmové hodnoty opět ve čtyřech rychlostních skupinách a porovnal s pomaloběžným papírenským strojem.

U pomaloběžného papírenského stroje jsem zjistil, že zvyšující se pracovní rychlost má vliv na růst hodnot rychlosti, zrychlení, HFP a HFR, ale u obálek zrychlení byl zaznamenán i pokles hodnot. Podobně je tomu i u rychloběžného papírenského stroje, kde byla prokázána většinou zvyšující se tendence růstu hodnot rychlosti a zrychlení, ale u obálky zrychlení s filtrem 3 byly zaznamenány velké výkyvy.

V konečném porovnání hodnot rychlosti a zrychlení u těchto dvou různoběžných papírenských strojů je parné, že až na pokles v nejmenší pracovní rychlosti rychloběžného stroje je možné sledovat vzrůstající tendenci. Ovšem při srovnání hodnot rychlosti a zrychlení ze strany pohonu je patrné, že křivky na sebe nenavazují, což může být způsobenou odlišnou konstrukcí stroje, nebo taky tím, že v případě pomaloběžných strojů bylo měřeno 36 válců za dlouhé období, kdežto u rychloběžných strojů pouze jeden válec v poměrně kratším intervalu.

Je také důležité se zabývat poklesem hodnot ve skupině $550 - 649,9 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ve srovnání pomaloběžných a rychloběžných papírenských strojů. Vhodné by bylo provést měření na více válcích rychloběžného stroje, a pokud by byly výsledky podobné, mohlo by se jednat o rezonanční útlum v tomto rozsahu otáček.

Použitá literatura

- [1] ING. DR. HNĚTKOVSKÝ, Václav. *Papírenská příručka*. 1. vyd., Praha: SNTL, 1983, 864 s. ISBN 04-625-83.
- [2] JUDASZ, Aleksandra. *Estimation of impact of alternative papermaking additives on paper web dewatering intensity and paper properties*. Lodz: Technical University of Lodz, Institute of Papermaking and Printing, 2009, 104 s. Vedoucí diplomové práce: dr eng. Konrad Olejnik.
- [3] Dr. BOB, Jones. *Monitorování pomaloběžných ložisek pomocí Micrologu CMVA 60ULS (ultra nízké otáčky)*. SKF Condition Monitoring, 1999. 8 s.
- [4] BARCLAY, John, Wei, Jim. *General Alarm Guidelines for Enveloped Acceleration Measurements*. REVOLUTIONS, a publication of SKF Condition Monitoring, Vol 6, No. 2, 1998. 69 s.
- [5] BERRY, J. E., Wei, Jim. *Ověřená metoda specifikování poplachových úrovní a frekvencí pro spektrální pásma při použití současných programových systémů prediktivní údržby*. Praha: SKF, 1994. 110 s.
- [6] JAMRICH, Martin; DOLEŽAL, Ivan. *Výroba papíru v papírně MD Albbbruck* [online]. c2006⁰², [cit. 10. února 2016]. Dostupné z: http://www.svettisku.cz/buxus/generate_page.php?page_id=2415&
- [7] GRAF, R. Hans. *Sulzer Technical Review* [online]. c2013⁰¹, [cit. 10. února 2016]. Dostupné z: https://www.sulzer.com/es/-/media/Documents/Cross_Division/STR/2013/STR_2013_1_30_33_Graf.pdf
- [8] ABELMANN, Jörg. *Paper Machine* [online]. c2012⁰⁶, [cit. 11. února 2016]. Dostupné z: <http://www.slideshare.net/SappiHouston/paper-machine>
- [9] Marketingové oddělení PAPCEL[®] a.s. *PAPCEL[®] a.s. Katalog firmy* [online]. c2011, [cit. 14. února 2016]. Dostupné z: <http://www.papcel.cz/UserFiles/Flash/cs/katalog/index.html#/1/>

[10] *Paper and board production - demo* [online]. c2005⁰⁹, [cit. 15. února 2016].

Dostupné z:

<http://www.knowpap.com/www_demo/english/paper_technology/general/5_papermaking/frame.htm>

[11] *Microlog CMVA 60 Portable Data Collector/FFT Analyzer* [online]. c2000, [cit. 13. března 2016].

Dostupné z: <http://www.hivimar.com/descargas/documentos/microlog_cmva_60.pdf>

[12] *Periodcké měření vibrací PS2 2015*. Dif spol s r.o., Žimrovice. c2015, [cit. 4. dubna 2016].

[13] *Online měření vibrací prvního lisu*. Dif spol s r.o., Žimrovice. c2016, [cit. 23. dubna 2016].

[14] *Výkres technické dokumentace papírenského stroje Smurfit Kappa Žimrovice s.r.o.* c2008⁰⁴, [cit. 9. dubna 2016].